Evoluzione estrema: lo strano caso dei ciclidi

Le Scienze

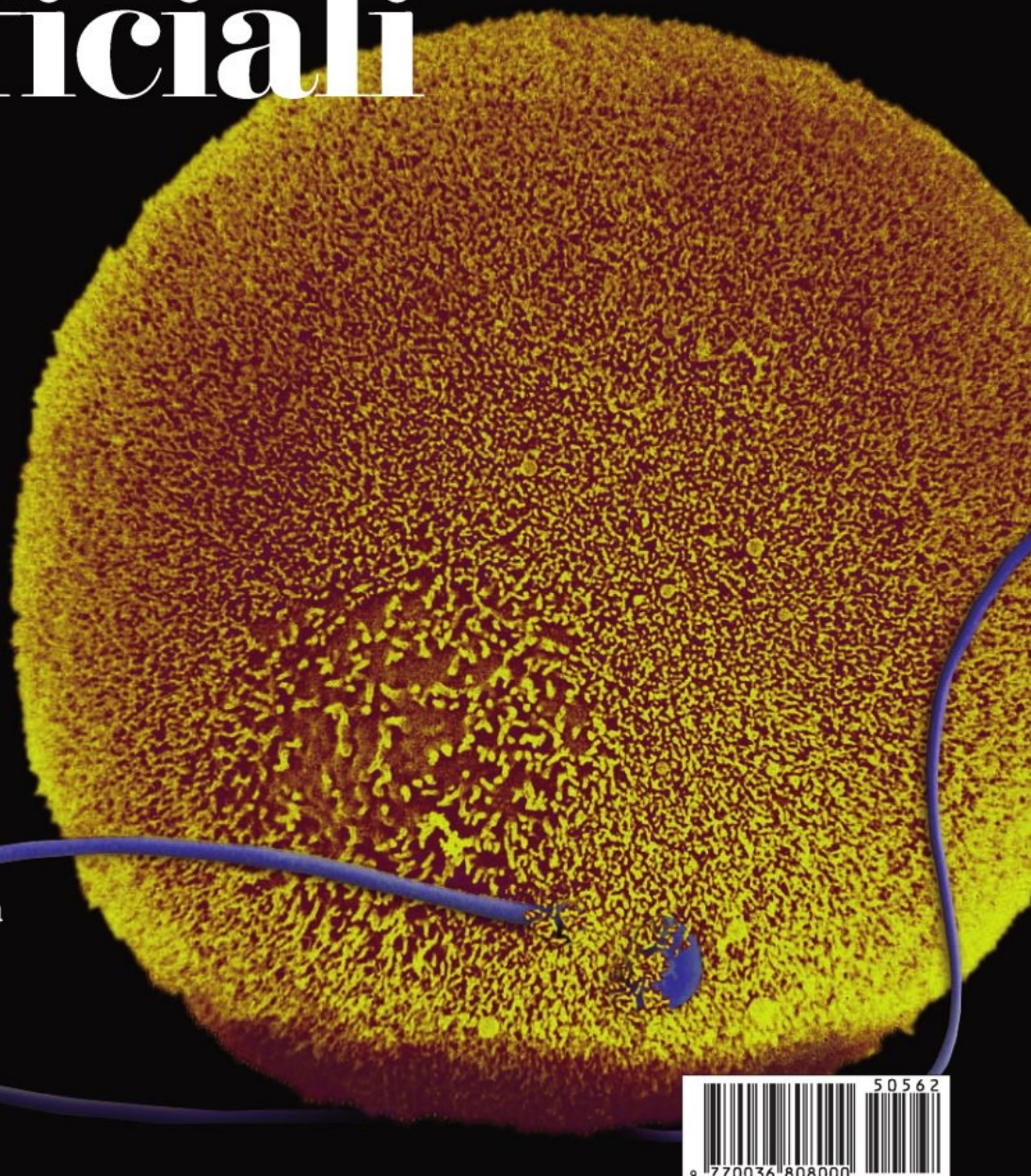
Giugno 2015 € 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Embrioni artificiali

La produzione di uova e spermatozoi da cellule adulte apre scenari rivoluzionari, e pone profonde questioni etiche



Fisica

La prima osservazione simultanea della doppia natura della luce

Disastri naturali

Un innovativo sistema di allerta precoce per convivere con le frane

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA RIVISTA MENSILE - NUMERO 562

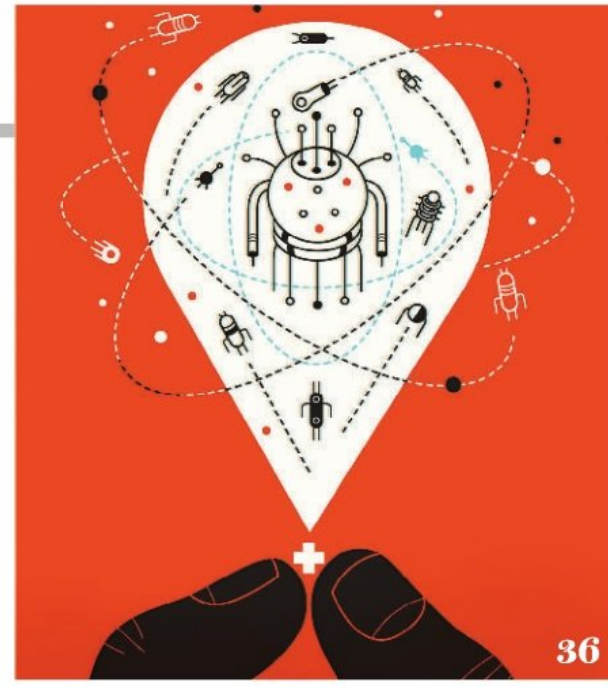
NUOVA DISCOVERY SPORT
L'AVVENTURA
È NEL NOSTRO DNA.
#DiscoverySport
landrover.it
LAND ROVER
ABOVE & BEYOND
DISCOVERY
DRD4 7R
FOR SAFER CARS
EURO NCAP
www.euroncap.com
TEST 2014
Primi nella categoria Small Off-Road 4x4 2014.
Land Rover consiglia Castrol. Scopri le soluzioni d'acquisto personalizzate
di LAND ROVER FINANCIAL SERVICES. Consumi da 5,7 a 7,3 litri/100 Km
(ciclo combinato). Emissioni CO_2 da 149 a 197 g/Km. TM © RWC Ltd 2008.
IRB
RUGBY
WORLD CUP
2015
WORLDWIDE PARTNER

IN COPERTINA

Esperimenti su topi hanno fatto nascere progenie da spermatozoi e uova ottenuti riprogrammando cellule adulte. E all'orizzonte c'è l'applicazione di questa tecnica anche per l'essere umano. (Foto: Dr. David Phillips/Visuals Unlimited/Corbis)

Sommario

Giugno 2015 numero 562



IL FUTURO DELLA MEDICINA 2015

36 Piccole meraviglie
di Josh Fischman

Grazie alla nanomedicina, gli scienziati stanno sviluppando nuovi metodi per combattere i tumori, guarire le ferite e pilotare i farmaci nelle cellule

38 Farmaci per il cancro: colpire nel segno
di Dina Fine Maron

Piccole strutture trasportano in modo efficace molecole anticancro verso le masse tumorali e riducono gli effetti collaterali

41 Fasciature intelligenti
di Mark Peplow

Nuovi materiali non si limiteranno a fasciare le ferite, ma allerteranno i medici in caso di problemi e somministreranno farmaci

44 Lanciate i nanorobot!
di Larry Greenemeier

Superare tutte le sfide tecniche può richiedere vent'anni o più, ma i primi passi verso una medicina telecomandata sono già stati fatti

FISICA

46 Anelli di fuoco
di Joseph Polchinski

I buchi neri potrebbero essere circondati da barriere in contrasto con la relatività generale e la meccanica quantistica

BIOLOGIA

52 Gameti artificiali
di Carlo Alberto Redi e Manuela Monti

La possibilità di produrre uova e spermatozoi riprogrammando cellule adulte dell'organismo apre scenari biomedici rivoluzionari e pone profonde questioni etiche

FISICA

60 Immagine di una doppia natura
di Fabrizio Carbone

Un esperimento ha osservato per la prima volta simultaneamente la natura ondulatoria e quella corpuscolare della luce

PSICOLOGIA

66 Conquista te stesso, conquisterai il mondo
di Roy F. Baumeister

L'autocontrollo è un tratto psicologico chiave che porta al successo nel lavoro e in altre attività quotidiane, e aiuta a superare le difficoltà della vita

SCIENZE DELLA VITA

72 Evoluzione estrema
di Axel Meyer

I pesci ciclidi sono stati protagonisti di uno stupefacente processo di speciazione. Nuovi studi ora rivelano le caratteristiche dei loro genomi che hanno creato le premesse per questa diversificazione

TECNOLOGIA

78 Vivere con una frana
di Valerio Gualerzi

Ad Ancona un sistema di allerta precoce unico in Europa sorveglia in tempo reale una zona franosa a ridosso di infrastrutture strategiche e su cui abitano numerose famiglie

SICUREZZA

84 Come sopravvivere alla cyberguerra
di Keren Elazari

Primo passo: smettete di contare sulla protezione degli altri

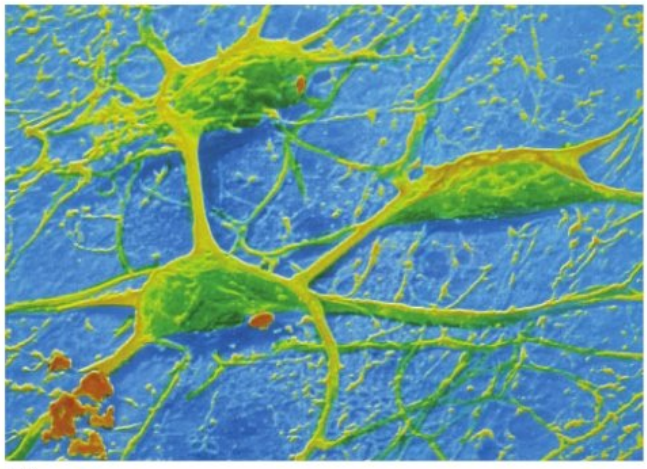
SVILUPPO SOSTENIBILE

88 Più pesce per tutti
di Eric Vance

Come un piccolo gruppo di innovatori sta cercando di nutrire la Cina e salvare gli oceani del pianeta

Illustrazione di Harry Campbell

Sommario



12

16

105

Rubriche

7 Editoriale
di Marco Cattaneo

8 Anteprima

10 Lavori in corso

12 Intervista
Prendere il cervello con filosofia *di Marco Furio Ferrario*

14 Made in Italy
Quando l'assistenza è digitale *di Letizia Gabaglio*

16 EXPOsed. L'Expo messa a nudo
L'invasione di EXPO *di Beatrice Mautino*

18 Scienza e filosofia
L'Antropocene della discordia *di Telmo Pievani*

20 Appunti di laboratorio
Siamo cavità intestinali evolute? *di Edoardo Boncinelli*

22 Il matematico impertinente
I numeri della letteratura *di Piergiorgio Odifreddi*

23 La finestra di Keplero
Il nostro posto nell'universo *di Amedeo Balbi*

24 Homo sapiens
Il valore delle differenze *di Giorgio Manzi*

97 Coordinate
Questa è la mia terra *di Mark Fischetti*

98 Rudi matematici
Un caso di probabilità casuale
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

100 Libri & tempo libero

104 Povera scienza
EmDrive, il motore magico *di Paolo Attivissimo*

105 Pentole & provette
Molecole mangiaproteine *di Dario Bressanini*

CNRI/SPL/Contrasto (*neuroni*); Ye Pingfan/Xinhua Press/Corbis (*Expo*); TongRo Images/Corbis (*carne e frutta*)

SCIENZA NEWS

27 Modificare o no gli embrioni?
28 Paparazzi del mondo dei quanti
28 Ghiaccio cubico grazie al grafene
29 Troppi antiprotoni nei raggi cosmici
29 L'inattesa rivincita dei fononi
30 Tandem batterico da alimentazione
30 Il segreto dell'invasività è la variabilità
30 Quando due specie diventano una
31 Un OGM naturale
31 I vantaggi dell'inbreeding nel gorilla
32 L'alba di *Homo sapiens* in Europa
32 Il ritorno del brontosauro
33 Quanto soleggiamento nel Paese del Sole?
33 Fracking e terremoti in Oklahoma
34 Brevissime

BioNike
SALUTE E BELLESSERE

Nickel Tested**
SENZA
Conservanti
Profumo
Glutine*

*Non contiene glutine o i suoi derivati. L'indicazione consente una decisione informata ai soggetti con "Sensibilità al glutine non-celiaca (Gluten Sensitivity)". **Anche contenuti residuali di nickel possono creare, in particolare nei soggetti predisposti, reazioni allergiche o sensibilizzazioni. Quindi ogni lotto è analizzato per garantire un contenuto di nickel inferiore a 0,00001%.

UN'AZIONE CHE SENTI, UN RISULTATO CHE VEDI

DEFENCE BODY

Anticellulite

DRENANTE RIDUCENTE

È un Dispositivo Medico CE 0546.
Leggere attentamente le avvertenze e le istruzioni per l'uso.
Aut. del 24/12/2014

BIONIKE
PER IL BENE DELLA
PELLE SENSIBILE

In Farmacia

TU E FASTWEB.
SIAMO LA FIBRA CHE VOLA.

Dentro la nostra Fibra scorrono i tuoi pensieri,
i tuoi sogni, i tuoi progetti e il tuo lavoro, ecco perché ti diamo sempre
la connessione internet più veloce possibile.

FASTWEB
un passo avanti

di Marco Cattaneo

Fecondazione 2.0

Nuove tecniche di riproduzione all'esame della politica

Sono trascorsi undici anni dall'approvazione della famigerata Legge 40, che disciplina – o forse sarebbe più opportuno dire disciplinava – la procreazione medicalmente assistita nel nostro paese. Una legge aspramente criticata e profondamente iniqua, il cui impianto è stato sostanzialmente smantellato da oltre 30 sentenze di tribunali e da tre pronunciamenti della Corte Costituzionale – l'ultimo pochi giorni fa – oltre che da una bocciatura della Corte europea dei diritti umani.

A sfogliare le pagine di questo numero, però, non è difficile rendersi conto che una legge relativamente recente, pur emendata di tutte le sue storture, rischia di essere ampiamente superata dal progredire delle conoscenze in materia di procreazione e dalle nuove tecnologie che ne derivano. Nella storia di copertina, che trovate a pagina 52, Carlo Alberto Redi e Manuela Monti delineano un futuro in cui sarà possibile prelevare cellule della pelle di individui adulti e derivarne cellule staminali pluripotenti da convertire in spermatozoi e uova. Dalla pelle. Procedure simili sono già state sviluppate nei topi, in cui si sono ottenute uova in grado di essere fecondate e capaci di produrre progenie fertile.

Ma c'è di più. Come hanno illustrato Renee Reijo Pera e colleghi su «Cell Reports» nel maggio 2014, se trapiantate nei tubuli seminiferi di topi, staminali pluripotenti indotte ottenute da cellule della pelle di uomini incapaci di produrre spermatozoi producono spermatozoi umani. E dalla pelle di donne sterili potranno essere ottenute uova fertili, mentre la necessità di usare i topi come bioreattori potrà essere superata sviluppando i gameti *in vitro*.

Ricerche di questa natura spalancano la possibilità di derivare addirittura cellule uovo dalla pelle di uomini e spermatozoi dalla pelle di donne, fino alla fantascientifica ipotesi di avere figli da spermatozoi e uova di uno stesso individuo. Fantascientifica? No, decisamente no. Parliamo di sviluppi tecnologici che avverranno da qui a cinque anni.

Ma voltiamo pagina, in senso letterale. E andiamo a pagina 27, precisamente. Dove si racconta come «Nature» e «Science» abbiano rifiutato la pubblicazione di un articolo sottoposto da ricercatori della della Sun Yat-sen University di Guangzhou,

in Cina: il primo articolo che descrive il tentativo di manipolare geneticamente un embrione umano, poi apparso su «Protein&Cell».

Non sarà facile per la politica tenere il passo di progressi tecnologici tanto vertiginosi e che aprono interrogativi etici nuovi ma certo non inattesi. Eppure di queste potenzialità bisognerà tenere conto nel momento in cui si dovranno varare norme per disciplinare le sconfinate applicazioni di queste tecnologie. Non resta che augurarsi che quando sarà ora di approvare leggi su questa delicatissima materia sia in carica un Parlamento più istruito, maturo e responsabile di quello che ha approvato la Legge 40.

Alexey Losevich/Shutterstock

Comitato scientifico

Leslie C. Aiello
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research

Roberto Battiston
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento

Roger Bingham
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Edoardo Boncinelli
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Arthur Caplan
docente di bioetica, Università della Pennsylvania

George M. Church
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School

Rita Colwell
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

Drew Endy
docente di bioingegneria, Stanford University

Ed Felten
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University

Michael S. Gazzaniga
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara

David Gross
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)

Daniel M. Kammen
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley

Christof Koch
docente di biologia cognitiva e comportamentale, California Institute of Technology

Lawrence M. Krauss
direttore, Origins Initiative, Arizona State University

Morten L. Kringelbach
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus

Steven Kyle
docente di economia applicata e management, Cornell University

Robert S. Langer
docente, Massachusetts Institute of Technology

Ernest J. Moniz
docente, Massachusetts Institute of Technology

John P. Moore
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University

M. Granger Morgan
docente, Carnegie Mellon University

Miguel Nicolelis
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University

Martin Nowak
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University

Robert Palazzo
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute

Telmo Pievani
professore associato filosofia delle scienze biologiche, Università degli Studi di Padova

Carolyn Porco
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute

Vilayanur S. Ramachandran
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego

Lisa Randall
docente di fisica, Harvard University

Carlo Alberto Redi
docente di zoologia, Università di Pavia

Martin Rees
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge

John Reganold
docente di scienza del suolo, Washington State University

Jeffrey D. Sachs
direttore, The Earth Institute, Columbia University

Terry Sejnowski
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies

Michael Snyder
docente di genetica, Stanford University School of Medicine

Giorgio Vallortigara
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento

Lene Vestergaard Hau
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University

Michael E. Webber
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin

Steven Weinberg
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)

George M. Whitesides
docente di chimica e biochimica, Harvard University

Nathan Wolfe
direttore, Global Viral Forecasting Initiative

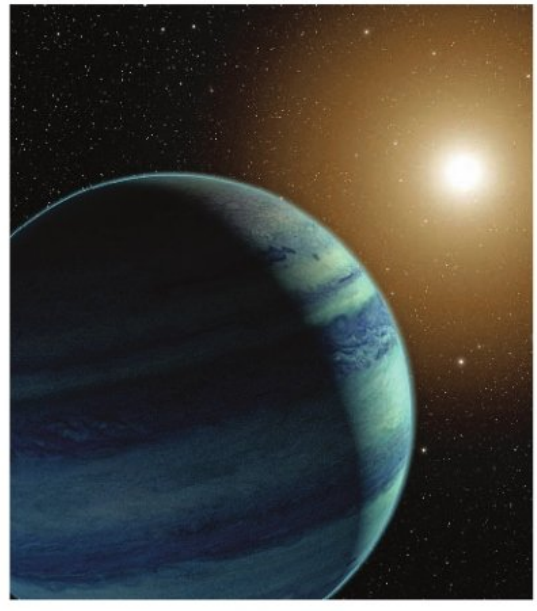
Anton Zeilinger
docente di ottica quantistica, Università di Vienna

A caccia di esopianeti

Strani mondi, di Ray Jayawardhana, è il libro allegato con il numero di luglio

Vent'anni fa veniva annunciata per la prima volta la scoperta di un pianeta in orbita attorno a una stella simile al nostro Sole. Il nuovo mondo scovato dagli svizzeri Michel Mayor e Dieder Queloz era un gigante gassoso, un po' come Giove, ed era lontano quasi 50 anni luce dalla Terra. Fu chiamato 51 Pegasi b, un riferimento alla stella attorno a cui orbitava, 51 Pegasi, nell'omonima costellazione di Pegaso.

Da allora, la caccia agli esopianeti, ovvero pianeti di altri sistemi stellari, è diventata uno dei settori più entusiasmanti della scienza, come racconta Ray Jayawardhana in *Strani mondi*, libro allegato a richiesta con «Le Scienze» di luglio e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni. Tanto per inquadrare lo scenario, sono oltre 1900 gli esopianeti rilevati con certezza in base a verifiche incrociate tra diversi gruppi di ricerca. Quelli ritenuti potenzialmente abitabili sono una ventina: alcuni hanno dimensioni terrestri, altri sono un po' più grandi della Terra e per questo vengono chiamati Super-Terre, tutti però sono abbastanza simili al nostro pianeta per composizione, e orbitano a una distanza dalla propria stella che permetterebbe la presenza stabile di acqua allo stato liquido in superficie. Una caratteristica necessaria, ma non sufficiente, per ospitare eventuali forme di vita.



I restanti esopianeti certi, la stragrande maggioranza, fanno parte di categorie che ricordano membri del nostro sistema solare: Giove e Nettuno. E poi ci sono oltre 3500 candidati a un posto nella galleria dei mondi lontani, grazie ai dati raccolti dal telescopio spaziale Kepler della NASA. Molti di questi candidati non passeranno l'esame della conferma, ma eventuali numerose bocciature non scalfiranno l'entusiasmo dei cacciatori di esopianeti, e non potrebbe essere altrimenti considerati i risultati ottenuti dal 1995 a oggi.

Jayawardhana è uno di quei cacciatori, insegna fisica e astronomia alla York University, e ha anche un passato da giornalista per «Science» ed «Economist». Questo mix di competenze ha portato a un libro rigoroso dal punto di vista scientifico e chiaro dal punto di vista della divulgazione. I protagonisti sono i tanti colleghi scienziati dell'autore, che nel corso degli anni hanno affinato i metodi con cui rilevare pianeti di altri sistemi stellari. Dal metodo del transito, in cui si osserva la diminuzione della luminosità di una stella per effetto di un'eclissi causata dal passaggio di un corpo celeste, a quello che misura la velocità radiale della stella quando compie dondolii a causa degli strattoni gravitazionali dell'eventuale pianeta vicino, al *microlensing* gravitazionale, che rileva gli effetti della gravità di stella e pianeta sulla radiazione elettromagnetica emessa da stelle sullo sfondo della coppia.

I protagonisti sono anche astrofili come la signora neozelandese Jennie McCormick, la quale nel 2005, con un telescopio amatoriale e senza preparazione scientifica, ha contributo a validare il microlensing, firmando un articolo su «Astrophysical Journal». E sono anche filosofi come Metrodoro di Chio, allievo di Democrito, il quale avrebbe scritto che «una spiga di grano in un grande campo è rara tanto quanto un unico mondo nello spazio infinito», e Giordano Bruno, che immaginava «innumerevoli Soli e innumerevoli terre tutte ruotanti attorno ai loro Soli», o ancora poeti come Lucrezio, il quale credeva che esistessero «altri mondi in altre parti dell'universo, con tipi differenti di uomini e di animali».

Oggi la nuova frontiera dei cacciatori di esopianeti è proprio quella immaginata 2000 anni fa da Lucrezio. Abbiamo tecniche che potrebbero permettere di rilevare firme di attività biologica su mondi lontani; e qualcuno tra gli addetti ai lavori inizia pensare che non dovremo aspettare ancora per molto.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Gli abbonati possono acquistare i volumi di **La Biblioteca delle Scienze** al prezzo di € 7,90 incluso il prezzo di spedizione e telefonando al numero 199.78.72.78 (0864.256266 chi chiama da telefoni non abilitati).

La stessa offerta è valida per acquistare i volumi della collana **I grandi della scienza** nella nuova edizione al prezzo di € 6,90 incluso il prezzo di spedizione.
Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (IVA inclusa).

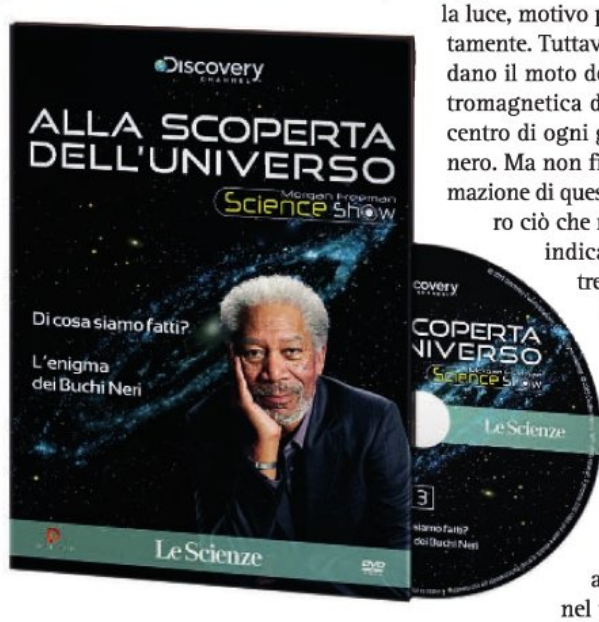
Cortesia NASA/JPL/Caltech

Dalle particelle ai buchi neri

A giugno a richiesta il terzo DVD della collana *Morgan Freeman Science Show*

Dai segreti più intimi della materia agli oggetti più misteriosi del cosmo. Il terzo DVD della collana *Morgan Freeman Science Show. Alla scoperta dell'universo*, in edicola a giugno a soli 8,90 euro oltre al prezzo della rivista, racconta in due diverse parti gli scienziati e le potenti macchine che cercano di descrivere sempre più in dettaglio il mondo delle particelle subatomiche, e i ricercatori che studiano i buchi neri, anche grazie a innovative simulazioni al computer.

Sono passati quasi tre anni dalla scoperta del bosone di Higgs, la particella elementare che conferisce massa alle altre particelle elementari, teorizzata nella metà degli anni sessanta dai fisici Peter Higgs, François Englert e Robert Brout. Sebbene epocale, la scoperta dell'Higgs a opera del Large Hadron Collider, l'acceleratore di particelle che opera al CERN di Ginevra, non è che un tassello del puzzle messo insieme da generazioni di fisici. Fino a oggi, lo schema che descrive le varie particelle elementari e le loro interazioni, il cosiddetto modello standard, funziona abbastanza bene. Tuttavia sono ancora tante le domande senza risposta.



Grazie a macchine potenti, i rivelatori, che agiscono come giganteschi microscopi, e a tunnel sotterranei in cui le particelle sono accelerate fino a quasi la velocità della luce nel vuoto, gli scienziati cercano tra l'altro di riprodurre i primi istanti di vita dell'universo, ovvero cercano di simulare il big bang. L'obiettivo di queste ricerche è capire come da quell'istante primigenio assai bizzarro, con temperature e densità quasi infinite, siamo arrivati al cosmo come lo osserviamo oggi. Per esempio, le quattro forze fondamentali descritte dal modello standard (elettromagnetica, gravitazionale, nucleare forte e nucleare debole) oggi agiscono separate, ma la teoria ci dice che a energie incredibilmente elevate le quattro forze si uniscono in una sola. E poi c'è lo studio dell'antimateria, una forma di materia in cui le particelle sono uguali in tutto e per tutto a quelle che compongono il mondo che ci circonda, a eccezione della carica elettrica: per esempio un atomo di antidrogeno è formato da un protone con carica negativa e un elettrone con carica positiva. Gli esperimenti con l'antimateria sono un modo per verificare l'esattezza delle conoscenze sulla materia, un po' come avere il negativo di una foto.

Nella seconda parte del DVD, Morgan Freeman ci guida alla scoperta dei buchi neri, gli oggetti astronomici più affascinanti. Nulla può sfuggire alla loro attrazione gravitazionale, nemmeno la luce, motivo per cui è impossibile osservarli direttamente. Tuttavia, osservazioni indirette che riguardano il moto delle stelle oppure la radiazione elettromagnetica da loro emessa, suggeriscono che al centro di ogni galassia dell'universo ci sia un buco nero. Ma non finisce qui, perché la teoria della formazione di questi oggetti, in base alla quale sarebbero ciò che rimane di immani esplosioni stellari, indica anche che in diverse galassie potrebbero esserci buchi neri non solo nel centro, ma pure in zone più periferiche. Così potrebbero formarsi coppie interagenti che darebbero vita a una sorta di valzer di buchi neri, che gli scienziati riproducono al computer in cerca di segni distintivi da osservare poi nel cielo.

Ma come per lo zoo delle particelle, anche nel caso dei buchi neri abbiamo molto da scoprire. In effetti, nel tentativo di descriverli può capitare che emergano discussioni accese tra le migliori menti della fisica. Per esempio tra Stephen Hawking e Leonard Susskind, i quali per lungo tempo hanno dibattuto su un paradosso che emergeva da una proprietà dei buchi neri ipotizzata da Hawking. Alla fine, l'ha spuntata Susskind, e le conseguenze potrebbero riguardare la natura profonda della realtà che ci circonda, che non sarebbe altro che un ologramma.

PIANO DELL'OPERA

1 Cosa è successo prima del Big Bang?
Siamo soli nell'Universo?

2 Si può viaggiare nel tempo?
Come siamo arrivati fin qui?

3 Di cosa siamo fatti?
L'enigma dei Buchi Neri

4 Oltre la materia oscura
Esiste un Creatore?

5 La particella di Dio
Cos'è il nulla?

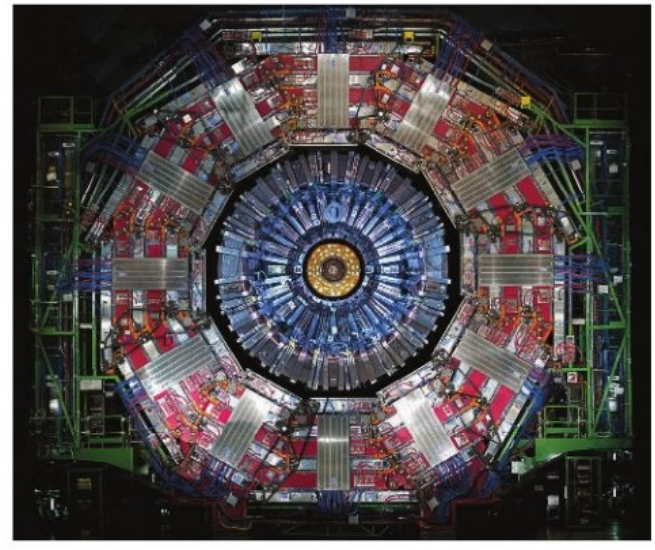
6 Tempo e spazio infiniti?
Sopravvivremo alla fine del sole?

a cura di Giovanni Spataro

Una teoria sempre più precisa

La validità del modello standard è stata confermata da eventi rari rilevati da LHC

La migliore teoria che abbiamo a disposizione per descrivere le tante particelle elementari alla base dell'universo e tre delle quattro forze fondamentali della natura (elettromagnetica, nucleare forte e nucleare debole, manca la gravità), vale a dire il modello standard, ha ottenuto un'ulteriore importante conferma dagli esperimenti CMS e LHCb del CERN di Ginevra (si veda *L'imminente rivoluzione della fisica delle particelle* in «Le Scienze», n. 476, aprile 2008). Come annunciato su «Nature», i ricercatori dei due esperimenti hanno rilevato il decadimento di mesoni B neutri, con cui si indicano in realtà due tipi di particelle: mesoni B *strange* e mesoni B *non strange*. Grazie a collisioni tra protoni accelerati nel Large Hadron Collider (LHC), CMS e LHCb hanno rilevato muoni, particelle elementari cugine degli elettroni, riconducibili al decadimento dei mesoni B neutri. Sono eventi rari secondo il modello standard: la probabilità che il decadimento avvenga è di una su un miliardo per il mesone B *strange* e di una su dieci miliardi per il mesone B *non strange*. Ora le aspettative sono tutte per la nuova stagione di esperimenti di LHC.



Cortesia Michael Hoch, Maximilien Brice/CERN (*CMS*); Peter Ginter/Science Faction/Corbis (*fotorivelatori*)

I sapori di IceCube

Nel 2013, l'osservatorio IceCube, composto da una schiera di fotorivelatori sepolti sotto il ghiaccio antartico, aveva rilevato neutrini con un'energia elevata, che suggerivano una origine cosmica per queste particelle elementari restie a interagire con la materia. Analisi successive avevano sostenuto l'ipotesi di un'origine extragalattica per i neutrini di IceCube.
Ora un'ulteriore conferma arriva su «Physical Review Letters» dai ricercatori della IceCube Collaboration, che hanno calcolato il rapporto tra i sapori dei neutrini osservati al Polo Sud, le tre identità - elettronica, muonica e tauonica - che queste particelle possono assumere e cambiare durante il loro tempo di vita.
I ricercatori hanno analizzato dati registrati tra il 2010 e il 2013, che hanno riguardato 137 neutrini con energie superiori a 35 teraelettronvolt. I risultati hanno mostrato una distribuzione dei sapori compatibile con un'origine cosmica, escludendo distribuzioni calcolate in passato sempre per le particelle rilevate da IceCube, che avrebbero però implicato nuova fisica per i neutrini.
A una conclusione simile è giunto un gruppo italiano del Gran Sasso Science Institute dell'Istituto nazionale di fisica nucleare. Andrea Palladino, Giulia Pagliaroli, Francesco Lorenzo Villante e Francesco Vissani hanno analizzato, sempre su «Physical Review Letters», eventi superiori ai 60 teraelettronvolt. Entrambi i risultati avvicinano sempre più osservazioni astronomiche basate su queste particelle (si veda *Con gli occhi dei neutrini* in «Le Scienze», n. 503, luglio 2010).

Occhi per neutrini. Una delle fasi di montaggio per fotorivelatori destinati all'osservatorio IceCube.

ERRATA CORRIGE

Sul numero di febbraio 2015, in *Gli strani percorsi della corrente a getto*, a p. 58, nella colonna di sinistra, quarto paragrafo dell'articolo, c'è scritto: «Le anse che disegna sono chiamate onde planetarie, o di Rossby: di solito impiegano dai tre ai cinque giorni per attraversare gli Stati Uniti, e generano la maggior parte dei fenomeni climatici che sperimentiamo quotidianamente». In realtà la frase corretta è: «Le anse che disegna sono chiamate onde planetarie, o di Rossby, e anse a scale più piccole chiamate onde corte, incorporate nelle onde di Rossby, di solito impiegano dai tre ai cinque giorni per attraversare gli Stati Uniti, e generano la maggior parte dei fenomeni climatici che sperimentiamo quotidianamente». Sempre a p. 58, quinto paragrafo, si legge: «L'inverno 2013-2014 ha però visto il tragitto della corrente a getto ampliarsi e formare giganteschi meandri dai bordi scoscesi, simili a un elettrocardiogramma dal tratto imprevedibile». In realtà, la frase corretta è: «L'inverno 2013-2014 ha però visto le onde di Rossby ampliarsi e formare giganteschi meandri dai bordi scoscesi, simili a un elettrocardiogramma dal tratto imprevedibile». A p. 62, colonna di sinistra, secondo paragrafo, si legge: «Modelli matematici mostrano che una corrente a getto più lenta fa avanzare più lentamente le onde di Rossby verso est». In realtà la frase corretta è: «Modelli matematici mostrano che una corrente a getto più lenta fa avanzare più lentamente le onde corte». Infine nell'illustrazione di pp. 60-61, la didascalia centrale recita: «Talvolta le anse, note come onde di Rossby, possono bloccarsi [...]». In realtà la frase corretta è: «Talvolta le anse possono bloccarsi [...]». Ci scusiamo con i lettori.

PER NOI NESSUNO VALE COME UN CLIENTE BMW.

SCOPRITE I SERVIZI DI VALORE CHE VI ABBIAMO RISERVATO.

Abbiamo particolarmente a cuore chi guida una BMW. Per questo abbiamo creato **Servizio di Valore BMW**, l'insieme degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria dedicati alle BMW che hanno già percorso molta strada. L'utilizzo esclusivo di Ricambi Originali BMW e il personale specializzato BMW Service vi garantiranno un **servizio di altissimo valore a condizioni vantaggiose e trasparenti.** Perché per noi, ogni membro della famiglia BMW è speciale come nessun altro.

Alcuni esempi di interventi:

OIL SERVICE

Cambio olio motore e filtro olio.

BMW Serie 1 - 120d	**€ 170,00**
BMW Serie 3 - 320d	**€ 175,00**
BMW Serie 5 - 530d	**€ 235,00**
BMW X1 - 20d	**€ 170,00**
BMW X3 - 20d	**€ 195,00**
BMW X5 - 30d	**€ 220,00**
BMW X6 - 35d	**€ 220,00**

PASTIGLIE FRENO ANTERIORI

Pastiglie freno e sensore dell'usura.

BMW Serie 1 - 120d	**€ 120,00**
BMW Serie 3 - 320d	**€ 130,00**
BMW Serie 5 - 530d	**€ 140,00**
BMW X1 - 20d	**€ 150,00**
BMW X3 - 20d	**€ 100,00**
BMW X5 - 30d	**€ 240,00**
BMW X6 - 35d	**€ 250,00**

CINGHIA CLIMA/ ALTERNATORE

BMW Serie 1 - 120d	**€ 70,00**
BMW Serie 3 - 320d	**€ 70,00**
BMW Serie 5 - 530d	**€ 130,00**
BMW X1 - 20d	**€ 110,00**
BMW X3 - 20d	**€ 110,00**
BMW X5 - 30d	**€ 170,00**
BMW X6 - 35d	**€ 180,00**

SCOPRITE SERVIZIO DI VALORE BMW SU **BMW.IT/SERVIZIODIVALORE** E NEL CENTRO BMW SERVICE A VOI PIÙ VICINO.

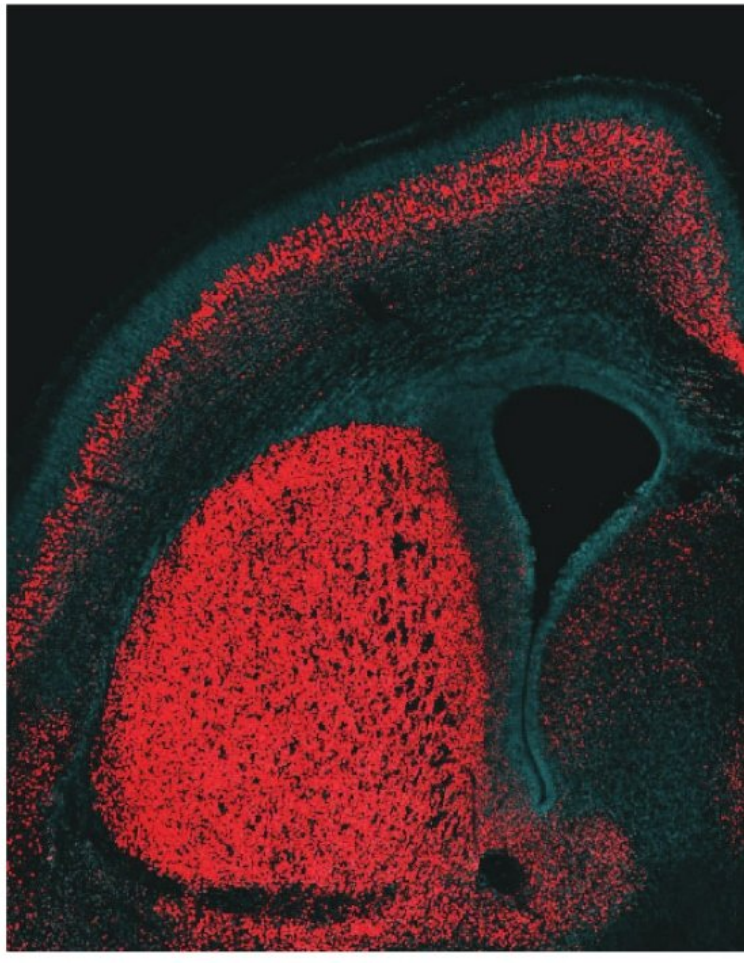
Servizio di Valore BMW è riservato ai possessori di BMW Serie 1 (E81/E82/E87/E88), BMW Serie 3 (E90/E91/E92/E93), BMW Serie 5 (E60/E61), BMW X3 (E83), BMW X5 (E70), BMW X6 (E71) e BMW X1 (E84) immatricolate entro il 31/12/2011. Sono esclusi i modelli M e le versioni speciali. L'offerta è valida fino al 30/11/2015 presso tutti i Centri BMW Service. Tutti i prezzi indicati includono Ricambi Originali BMW, manodopera e IVA.

di Marco Furio Ferrario

Prendere il cervello con filosofia

Passata dalla ricerca filosofica a quella scientifica, Marta Florio ha scoperto un gene da cui dipendono due tratti accentuati nel cervello del genere *Homo*

Pare che il filosofo Diogene il cinico ai tempi dell'antica Grecia «cercasse l'uomo». Oggi la ricerca, se non dell'Uomo con la «u» maiuscola, di quello che rende l'uomo così particolare fra tutti gli animali, si è arricchita del contributo di una giovane ricercatrice partita da analoghe indagini filosofiche. Marta Florio è la prima firma di uno studio pubblicato su «Science» sulla proliferazione dei progenitori neuronali e il ripiegamento della corteccia: con il gruppo del Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik di Dresda guidato da Wieland Huttner, ha mostrato che questi due tratti, particolarmente accentuati nel genere *Homo*, dipendono da un gene identificato solo nella nostra specie e nei «cugini» Neanderthal e Denisova.



Cortesia M. Florio, W.B. Huttner/Max Planck Institute of Molecular Cell Biology and Genetics

Che cosa l'ha spinta dalla ricerca filosofica a quella scientifica?

Non le considero in contraddizione, ma parallele. Sono partita da un contesto di filosofia della scienza, con domande sulla mente e il linguaggio, proprio quel quadro epistemologico mi ha spinto a cercare il fondamento biologico dei fenomeni. Ho imparato a problematizzare e contestualizzare, allenandomi a individuare le domande giuste, poi ho cercato di mantenere lo stesso approccio alla complessità anche in laboratorio, ma lavorando con domande più circoscritte.

Quanto è contato il lavoro di squadra nella vostra ricerca?

È stato indispensabile. Tutto è iniziato da una domanda: noi abbiamo più neuroni di ogni altra specie, quindi qualcosa a livello genetico deve determinare questa differenza, ma come trovare il pezzo giusto? Siamo partiti dal livello morfologico, elaborando una tecnica che ci permettesse di individuare nelle prime fasi di sviluppo i neuroni della neocorteccia, i loro progenitori e le cellule staminali. Il passaggio fondamentale doveva essere nei progenitori, perché è lì che noi abbiamo un'attività maggiore di proliferazione. Allora abbiamo isolato quelle cellule e prelevato l'RNA, lo abbiamo sequenziato per trovare geni attivi nei progenitori umani che non hanno controparte nei topi.

Questo lungo viaggio ha richiesto a ogni passo conoscenze che una sola persona non può abbracciare: per esempio la verifica della presenza del gene nella linea evolutiva è arrivata dal gruppo di Svante Pääbo a Lipsia, che ha isolato il DNA di Neanderthal e tanti altri apporti fondamentali sono venuti da specialisti di diverse aree. Il lavoro di squadra è una caratteristica essenziale della scienza moderna, una necessità che rende la ricerca appassionante e stimolante, ma che spesso non arriva al grande pubblico.

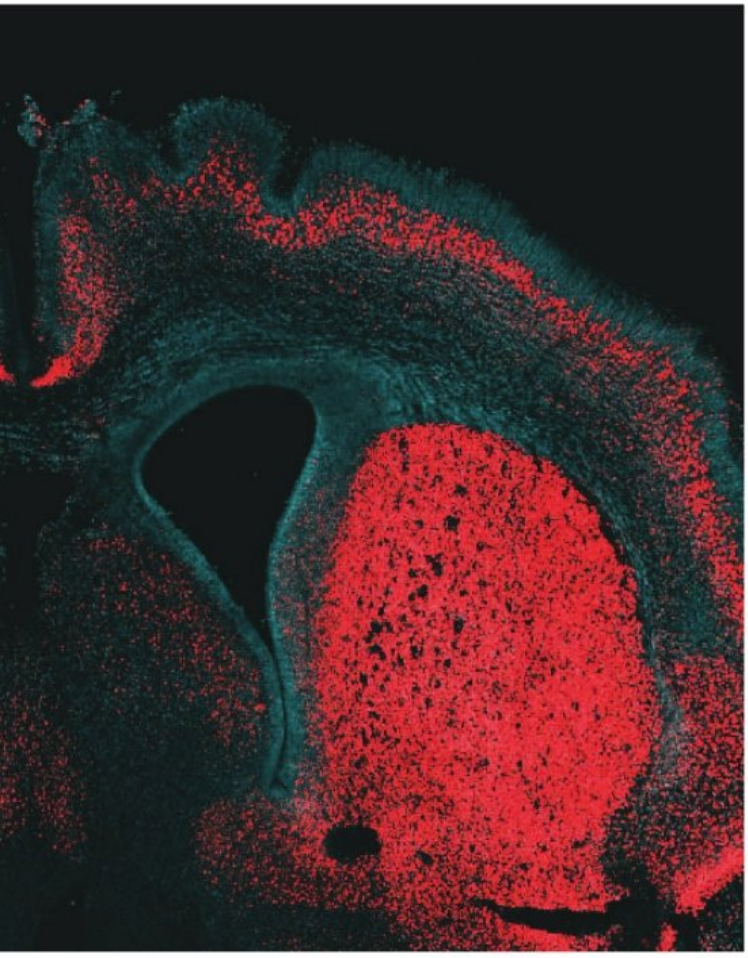
Con questa metodologia avete creato un protocollo che potrà essere usato per altre ricerche. Come funziona?

Ogni cellula contiene nel nucleo l'intero patrimonio genetico dell'organismo, ma ne trascrive in RNA solo quelle parti specifiche per il suo funzionamento. Per individuare i geni che rendono unica la nostra corteccia dovevamo restringere il campo alle cellule in cui con più probabilità potevano esprimersi: con marcatori fluorescenti che evidenziano la forma della membrana cellulare, abbiamo individuato staminali, progenitori e neuroni nei tessuti fetali di uomo e di topo. Quindi abbiamo estratto l'RNA da queste cellule e lo abbiamo sequenziato, allineandolo poi con il DNA per individuare i geni che comparivano nell'una, ma non nell'altra specie. Così abbiamo individuato 56 geni specifici dell'essere umano. Di questi uno in particolare, *ARHGAP11*B, ha mostrato il grado maggiore di espressione nelle cellule della glia.

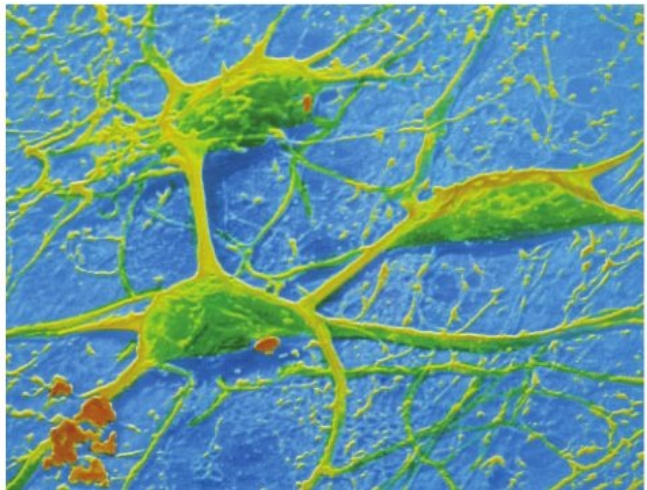
Un ultimo passo che ha dato la conferma definitiva dell'importanza del gene è stato il suo inserimento selettivo, attraverso elettroporazione, nella neocorteccia di topo al tredicesimo giorno

CHI È

Marta Florio ha conseguito la laurea triennale alla facoltà di filosofia dell'Università Vita-Salute San Raffaele di Milano, studiando problemi di filosofia della mente, del linguaggio e della coscienza. Si è laureata con Edoardo Boncinelli con una tesi sui geni *Hox* e ha continuato con la specialistica in neuroscienze cognitive per affacciarsi alla ricerca della neurobiologia dello sviluppo sotto la guida di Giacomo Consalez.
Per studiare l'evoluzione del cervello umano si è in seguito trasferita in Germania, al Max-Planck-Institut di Dresda diretto da Wieland Huttner.
Dopo il PhD intende spostarsi negli Stati Uniti per studiare i meccanismi genetici alla base dello sviluppo delle facoltà cognitive di alto livello, cercando nell'embriogenesi una chiave di lettura della complessità del cervello umano.



Sezione di corteccia embrionale di topo analizzata da Florio, il gene umano *ARHGAP11B* è espresso nella zona destra, come mostrano i ripiegamenti sulla superficie. Sotto, neuroni corticali.



Cortesia M. Florio (*Florio*); CNRI/SPL/Contrasto (*neuroni*)

dell'embrione: dopo cinque giorni, in metà dei casi analizzati, si è verificato l'arricciamento della corteccia con la proliferazione dei progenitori neuronali.

Questi esperimenti sarebbero stati possibili in Italia?

In Germania ci sono meno impedimenti: gli investimenti in ricerca sono più grandi e le fasi amministrative e burocratiche sono molto più efficienti. Al Max-Planck-Institut tutto quello che non è ricerca ha personale dedicato: per esempio c'è un ufficio che si occupa degli acquisti del materiale biologico e tecnico, e più in generale di ogni aspetto amministrativo. In Italia quel lavoro lo deve fare il ricercatore, togliendo tempo alla ricerca. Anche a livello culturale c'è una certa differenza, che in Italia può tradursi in divieti, per esempio per gli esperimenti *in vivo* sugli embrioni.

Il gene *ARHGAP11B* viene da una mutazione che ha creato una duplicazione troncata del gene *ARHGAP11A*. Dal punto di vista filosofico come interpreta la casualità intrinseca a vicende di mutazione come questa?

In termini darwiniani: il sistema deve essere abbastanza flessibile da permettere errori adattativi. Nel senso comune questo ruolo del caso genera spesso rifiuto, forse perché è vissuto come una riduzione dell'intero regno vivente a una storia di errori con conseguenze piacevoli. Per me invece è riduttivo sminuire l'eccezionalità di questo processo e il fatto che siamo in grado di comprenderlo.

Molte persone hanno espresso paure per possibili risvolti negativi in coda alle notizie che hanno riportato la vostra scoperta.

I mass media ci hanno abituato al sensazionalismo, perché attira più attenzione. Si sacrificano gli elementi che potrebbero dare gli strumenti per capire in favore di quelli che hanno più presa, anche se hanno scarsa aderenza alla realtà. È un atteggiamento paternalistico che rinuncia in partenza a trattare certe informazioni, quindi la reazione del pubblico non sorprende. Si dovrebbe comunicare il lavoro di squadra, la complessità dei temi e del percorso necessario a trattarli: invece il pubblico si sente tagliato fuori, perché gli scopi della scienza sono dipinti come lontani e incomprensibili, mentre per lo più nei laboratori ci si pone domande molto umili e concise.

Una filosofia diversa da quella cosiddetta «continentale», imperante in Italia, potrebbe avere un ruolo di avvicinamento alla scienza?

C'è già, ma fa fatica ad emergere. Io sono stata spinta dalle riflessioni di un genetista come Edoardo Boncinelli o di un linguista come Andrea Moro. Credo che le «grandi domande» possano essere sorrette e incalzate da conoscenze a un livello di dettaglio maggiore.

di Letizia Gabaglio

Quando l'assistenza è digitale

Ab.Acus è formata da bioingegneri impegnati nella realizzazione di tecnologie assistive e interfacce digitali per anziani e pazienti con malattie neurologiche

L'arte e la scienza della mediazione fra i bisogni delle persone, soprattutto quelle disabili e malate, e le idee degli ingegneri, fra l'esigenza di quantificare il più precisamente possibile la valutazione medica e la certezza che il cosiddetto «occhio clinico», non potrà mai essere sostituito del tutto da una macchina. È questa la cifra di Ab.Acus, azienda specializzata nella progettazione e sviluppo di prodotti e servizi tecnologicamente avanzati. Non a caso i suoi fondatori sono ingegneri biomedici, formati al Politecnico di Milano e cresciuti professionalmente nel centro di ricerche che l'ateneo milanese aveva aperto all'Istituto Don Gnocchi: è lì, fianco a fianco con i malati, che Enrico d'Amico e Maria Bulgheroni, hanno capito che, per essere davvero utili, le soluzioni tecnologicamente avanzate non possono prescindere dalla valutazione di chi poi le dovrà usare.

«Capitava spesso di mettere a punto un prodotto che in laboratorio sembrava rispondere alle esigenze, ma che alla prova dei fatti, indossato o usato da un malato, evidenziasse tutti i suoi limiti. Ci siamo presi alcuni rimproveri e abbiamo imparato molto dal confronto continuo con chi vive il disagio fisico», racconta d'Amico. È l'analisi del movimento il focus delle ricerche dell'ingegnere che all'inizio degli anni novanta lascia il centro ricerche per partecipare alla fondazione di una prima società, BTS, specializzata proprio nella decodifica dei movimenti umani utile a fine medici ma anche per la realizzazione di videogiochi.

Obiettivo movimento

La sua vera passione però è realizzare soluzioni utili. Così, nel 2006, decide di aprire Ab.Acus e di gettarsi in pieno nel mondo europeo della ricerca e sviluppo, cercando la collaborazione dei centri di eccellenza del vecchio continente e non. «Eravamo agli inizi e a una riunione organizzata dalla Commissione Europea ho incontrato un ricercatore israeliano che aveva un'idea innovativa per prevenire le cadute degli anziani in casa», racconta ancora d'Amico. «Rispetto a quello dei giovani, il movimento degli anziani è stereotipato, sempre uguale a se stesso. Manca cioè di quella flessibilità che consente di reagire a eventuali imprevisti. La codifica di questo movimento a livello cerebrale ha a che fare con la teoria del caos».

Per mettere insieme il gruppo migliore in questo campo, d'Amico deve tirare fuori, ancora una volta, le sue doti di mediatore e far collaborare ricercatori di origine israeliana e iraniana in uno stesso progetto europeo: Smiling. Alla fine li convince e il progetto realizza un prototipo robotico da indossare sotto le scarpe, che in tempo reale elabora i dati della camminata e cambia forma in modo da rimandare al cervello gli stimoli giusti per rendere il più flessibile possibile il movimento di chi lo indossa. Dopo questo primo successo la strada dei progetti europei per Ab.Acus è in discesa: «In Europa il processo di selezione è all'insegna della meritocrazia e segue tempi e modi certi. Se ti accrediti con buoni risultati entri a far parte di una rete di eccellenza», spiega l'ingegnere.

I campi di ricerca di Ab.Acus sono la gerontecnologia, con lo scopo di trovare soluzioni per la riabilitazione e per la vita indipendente dei cittadini anziani, l'*assistive technology*, per il disegno e lo sviluppo di strumenti usabili e accessibili, la neuropsicologia, con l'analisi del movimento condotta in collaborazione con

LA SCHEDA

Ab.Acus

Fatturato
200.000 euro

Investimenti in ricerca
120.000 euro

Dipendenti/collaboratori
9 di cui 8 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
1

Glowimages/Corbis

Di nuovo indipendenti. Uno dei campi di ricerca di Ab.Acus è la gerontotecnologia, che cerca soluzioni per la riabilitazione e per la vita indipendente degli anziani.

Creativa Images/Shutterstock

l'Università di Padova e l'IRCCS Burlo Garofolo di Trieste. Dopo Smiling, è stato il turno di Happy Ageing, un progetto di ricerca nel campo dell'*assisted living* che aveva l'obiettivo di cercare soluzioni alle piccole grandi sfide che gli anziani possono incontrare nella vita di tutti i giorni.

«I problemi che assillano queste persone possono apparire banali, come non trovare più le chiavi di casa o non riuscire a telefonare, ma dal punto di vista ingegneristico non lo sono. Il difficile è risolverli realizzando oggetti semplici», sottolinea l'amministratore delegato di Ab.Acus. E non c'è solo la ricerca: l'azienda di Milano, ha partecipato a cordate europee che sviluppano soluzioni da portare sul mercato. «Con il progetto Mundus abbiamo messo a punto un sistema di assistenza che aiuta i pazienti affetti da malattie neurodegenerative a far fronte alla loro crescente disabilità», aggiunge d'Amico. «Il prosieguo di quel progetto è stato Retrainer, di cui siamo coordinatori, che ha l'obiettivo di sviluppare un sistema robotico per aiutare nella riabilitazione i pazienti colpiti da ictus. E di arrivare a metterlo sul mercato».

Un sistema di *mobile health*

Insomma, quella per i progetti europei è una vera passione per Ab.Acus, che nel 2015 è coinvolta in ben cinque cordate di ricerca. Come m-RESIST che aiuterà a prevedere il comportamento dei pazienti con schizofrenia e permetterà la creazione di un sistema di allerta per consentire loro di aver un ruolo attivo nella gestione della propria malattia con l'obiettivo di una riduzione di sintomi, di ricadute e di ospedalizzazione. Qui, di nuovo, l'arte della mediazione si deve fare strada con decisione: i pazienti psicotici possono vivere spesso situazioni in cui si sentono minacciati o perseguitati, realizzare quindi un sistema di *mobile health* che permetta di monitorare la loro vita non è certo banale.

«Ancora una volta il nostro valore aggiunto è stata l'esperienza maturata in tutti questi anni a fianco dei pazienti, di cui abbiamo imparato a capire le esigenze», spiega d'Amico. L'obiettivo è realizzare dispositivi mobili e indossabili che controllino una serie di parametri - dal numero di medicine assunte, al cibo consumato, alla sudorazione o la conducibilità elettrica della pelle - per valutare da remoto se il paziente ha bisogno di intervento medico.

Fra progetti e linee di ricerca improntate alla concretezza trova spazio anche la riflessione sociologica e filosofica: Digital Do It Yourself è stato finanziato dalla Commissione Europea per esplorare l'impatto del movimento dei *makers*, gli artigiani del nuovo millennio, nell'organizzazione del lavoro, dell'educazione, della ricerca, ma anche dal punto di vista sociale, legale ed etico. Una nuova sfida per le capacità di mediazione di Ab.Acus.

L'invasione di EXPO

A partire da questo numero, un'esperta divulgatrice indaga sugli aspetti meno noti e pubblicizzati di EXPO2015: cominciando da un progetto unico nel suo genere

"Sei un'ape. Vola in mezzo agli alberi da frutto, annusa i fiori di campo e raggiungi il tuo alveare. Lo trovi salendo le scale, là, in fondo a sinistra». Siamo appena entrati nel padiglione del Regno Unito all'EXPO, la grande Esposizione Universale ospitata per questa edizione dal nostro paese. Nel tragitto che percorriamo verso il «nostro» alveare incontriamo alberi, prati dall'aria incolta e insetti attratti dai tanti fiori presenti. Qualche visitatore starnutisce, qualcun altro si apparta fra le panchine nascoste in mezzo all'erba, i bambini cercano di strappare i fiori e un giardiniere innaffia le aiuole.

Se fossimo dotati di una «super vista» potremmo anche vedere il polline che vola trasportato dal vento, dagli insetti o da noi stessi, potremmo vedere le spore dei funghi che si lasciano trasportare dall'acqua di scarico e non passerebbero di certo inosservate le larve di insetto depositate nel terreno.

L'EXPO di quest'anno è anche questo. Ognuno dei 145 paesi presenti ha cercato di declinare il tema generale della manifestazione costruendo padiglioni che vanno dal bellissimo al mediocre, ma che sono quasi tutti accomunati dalla massiccia presenza di piante. E ogni paese si è portato le proprie. Percorrendo il Decumano, la lunga via centrale, si passa dall'autentica «aria austriaca» spruzzata dai nebulizzatori del padiglione dell'Austria in quella che sembra essere a tutti gli effetti una foresta alpina, al clima tropicale del Brasile, con le piante di quinoa, patate dolci e cacao fino, alle coltivazioni verticali di cereali di Israele. Alberi, arbusti, fiori, germogli: a EXPO si vede di tutto, e non fosse per la parsimonia di alcuni padiglioni nel mettere i cartellini identificativi sembrerebbe di stare in un gigantesco giardino botanico in versione parco giochi.

Ye Pingfan/Xinhua Press/Corbis (*sopra*); Splash News/Splash News/Corbis (*a fianco*)

Misurare la biodiversità

Tutto molto bello da vedere, toccare e annusare, ma «ci aspettiamo l'invasione», ci dice Maurizio Casiraghi, direttore dello Zoo-PlantLab dell'Università di Milano-Bicocca e Presidente della Società italiana di biologia evoluzionistica. Casiraghi coordina un progetto di monitoraggio dell'area dell'EXPO unico nel suo genere. L'obiettivo è quello di individuare in tempo reale l'eventuale contaminazione di una specie invasiva, monitorarla e, se necessario, attivare misure di contenimento.

Casiraghi ci spiega che «quando si parla di specie invasive, chiamate anche «alloctone» o «aliene», si intendono piante, animali, funghi o microrganismi la cui introduzione in un ambiente sconvolge gli equilibri ecologici locali provocando danni notevoli all'agricoltura o alla salute». Un esempio? *Xylella fastidiosa*, il batterio di origine sudamericana che sta decimando le coltivazioni di olivi nel Salento; ma i lettori allergici ai pollini conosceranno bene un'altra specie invasiva arrivata qui dal continente americano e ormai diffusissima, soprattutto in Lombardia: *Ambrosia artemisiifolia*.

Capiamo da Casiraghi che «si stima che possa attecchire e poi

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Le piante, interpretate in ogni forma e variazione, sono grandi protagoniste delle architetture dell'Esposizione.

Antonio Masiello/NurPhoto/Corbis

diffondersi circa l'1 per cento di ciò che arriva qui», e capite che un evento di portata mondiale come l'EXPO, che vedrà in questi mesi grandi flussi di visitatori, ma che ha visto nei mesi passati un via vai di operatori e merci, non poteva non essere tenuto d'occhio per prevenire, prima ancora di pensare a come curare.

«Si parla tanto di biodiversità, spesso a sproposito – ci racconta Casiraghi – ma noi la biodiversità la misuriamo davvero». Come? Con la tecnica del DNA *barcoding*, una specie di lettore di codici a barre per DNA. «Così come ogni prodotto commerciale è caratterizzato da un codice a barre, anche specifici tratti di DNA (definiti «marcatori molecolari») possono essere letti per identificare determinate specie».

Omaggi pericolosi

Nella pratica, i ricercatori dello ZooPlantLab hanno distribuito campionatori di aria e di acqua nel territorio attorno all'EXPO: «uno sul palazzo delle poste a Roserio, un altro sul tetto di una fabbrica, un altro ancora dentro al carcere di Bollate, con cui abbiamo aperto una collaborazione, e poi tanti altri anche nei corsi d'acqua», ci mostra Casiraghi. Una volta raccolti i campioni, ne estraggono il DNA e poi, con gli strumenti molecolari del DNA barcoding e un gran lavoro di bioinformatica, vanno a identificare le specie presenti. «Abbiamo una mole di dati impressionante. Pensate che ogni campionamento genera sequenze di DNA di milioni di basi che poi andiamo a confrontare con le sequenze presenti nelle banche dati per identificare le specie» ci spiega Casiraghi.

Per un anno, prima dell'apertura della manifestazione, gli scienziati dello ZooPlantLab hanno raccolto mensilmente i campioni e li hanno analizzati per ottenere una fotografia della biodiversità dell'area. A partire dal mese di aprile 2015 e fino alla primavera del 2016, invece, il programma è nella fase di massima allerta, e i campionamenti sono effettuati ogni settimana. E ogni volta gli scienziati dello ZooPlantLab devono riferire all'ARPA e agli organismi di controllo regionali i risultati.

Ma che succede se il sistema individua una specie «nuova», che prima non era presente? «Durante il periodo EXPO ci aspettiamo di vedere molti segnali, vista la grande presenza interna di piante nel loro periodo di fioritura. A partire da novembre, però, dovremmo veder tornare la situazione alla normalità, cioè a com'era prima dell'apertura. Se questo non accade, allora lì scatta l'allarme vero, perché vuol dire che qualcosa ha attecchito». Anche se non esiste una ricetta precostituita per definire una strategia di contenimento. «È la prima volta che si prova a fare una cosa di questo tipo. Dovremo studiare soluzioni *ad hoc* – ci spiega Casiraghi – e speriamo che alla fine dell'EXPO i paesi ospiti smaltiscano le piante senza dispenderle nell'ambiente o regalarle ai visitatori».

Torneremo allo ZooPlantLab tra un anno, a manifestazione finita, per vedere se l'invasione c'è stata davvero, ma nel frattempo se andate all'EXPO e cercano di regalarvi una pianta in vaso rifiutate cortesemente, e dite che lo fate per salvaguardare la biodiversità.

di Telmo Pievani
è professore associato di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova

L'Antropocene della discordia

Pro e contro della proposta di un'epoca geologica caratterizzata dalla nostra specie

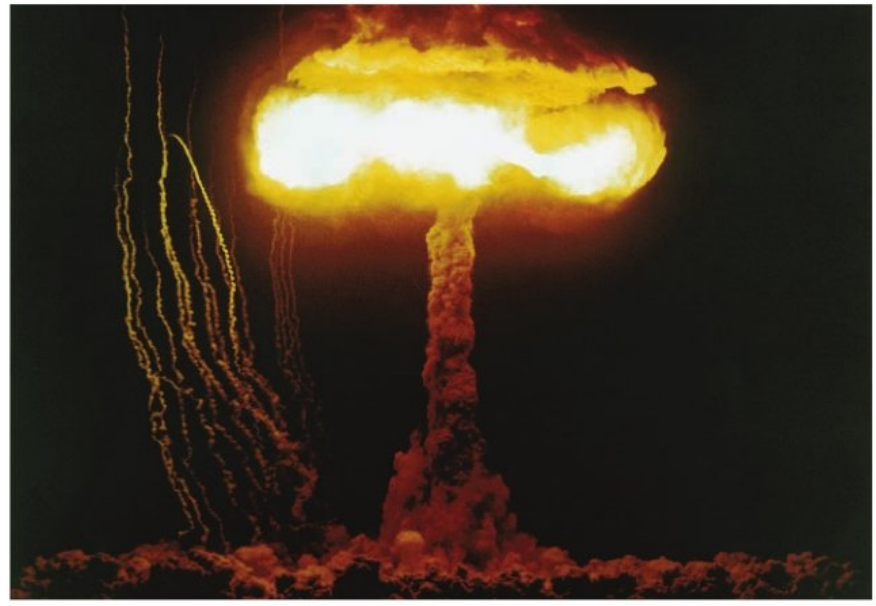
Fra dieci milioni di anni, quando i paleontologi del futuro si metteranno a scavare in concomitanza del sottilissimo strato che corrisponde alla nostra epoca, rimarranno di stucco. In un battito di ciglia del tempo geologico, vedranno che una sola specie, con le sue attività minerarie, ha spostato più sedimenti di tutti i fiumi della Terra messi insieme. Quella stessa specie, immettendo gas serra in atmosfera, ha riscaldato rapidamente il pianeta e fatto innalzare il livello dei mari. E poi: ha eroso lo strato di ozono, acidificato gli oceani, frammentato gli habitat ed estinto quasi la metà di tutti gli altri esseri viventi. Per ciascuna di queste imprese sarà rimasta una traccia geologica, una cicatrice indelebile sulla superficie terrestre.

Traendo le debite conseguenze da questi fatti, nel 2002 il chimico Paul J. Crutzen, premio Nobel per i suoi studi sullo strato di ozono, propose su «Nature» di dare un nome alla «geologia dell'umanità», cioè alla recente drammatica fase in cui *Homo sapiens* è diventato un fattore geofisico su larga scala: «Antropocene». Avanzata quasi per caso dopo un convegno, la proposta ebbe subito successo e la parola cominciò a circolare in modo virale sui giornali, nei musei e anche nella comunità scientifica.

Di «era antropozoica» si discuteva peraltro già nell'Ottocento. Adesso l'International Commission on Stratigraphy ha preso sul serio la questione e ha istituito un gruppo di lavoro apposito, coordinato dal geologo dell'Università di Leicester Jan Zalasiewicz, per valutare se sia davvero il caso di introdurre l'Antropocene nell'immensa scala del tempo geologico, in quel monumento dell'intelletto umano che scandisce 4,5 miliardi di anni di storia della Terra.

Di recente «Nature» ha dedicato uno speciale a questo dibattito. I favorevoli hanno gioco facile nel far notare che le attività umane contemporanee lasceranno un segno irreversibile e sincronico nelle stratigrafie di tutti i depositi geologici al mondo, compresi sedimenti oceanici e ghiacciai. Gli scettici ribattono che un'unità geologica nuova e dominata dalla presenza umana è appena stata aggiunta, nel 2008, dopo lunghe discussioni: è l'Olocene, l'epoca che inizia ufficialmente con il riscaldamento climatico successivo all'ultima glaciazione, intorno a 11.700 anni fa, insieme all'agricoltura. Già l'Olocene è geologicamente sottilissimo, a maggior ragione lo sarà l'Antropocene, una questione di decimi di millimetro, per ora. Bisognerebbe esercitare una pazienza geologica e delegare la decisione a chi verrà fra 1000 anni, ma noi abbiamo fretta di prendere decisioni epocali.

E poi, da dove far cominciare l'Antropocene? Crutzen, chimico dell'atmosfera, non aveva dubbi: dalla rivoluzione industriale della seconda metà dell'Ottocento e dai suoi effetti sulla composizione dell'aria. Tuttavia, già le attività agricole modificarono radicalmente la superficie terrestre e l'atmosfera. In tal caso l'Antropocene andrebbe quasi a sostituire l'Olocene. Altri guardano invece più vicino e pensano che la grande accelerazione delle attività umane con impatto geofisico sia avvenuta nel secondo dopoguerra, con le grandi dighe, l'uso massiccio di fertilizzanti, la diffusione della plastica, il consumo di acqua e petrolio. Per i sostenitori di questa datazione recentissima c'è anche un marcatore globale preciso: il *fallout* radioattivo prodotto dall'esplosione delle prime bombe atomiche (due sganciate sulla popolazione civile in Giappone e altre 500 fatte brillare nei test fino al 1963).



Segno di civiltà? Un test nucleare effettuato nel deserto del Nevada nel 1953; la potenza dell'ordigno era di 61 chilotoni, quattro volte la bomba sganciata su Hiroshima.

Corbis

Prima di cambiare i manuali, la procedura decisionale della comunità internazionale sarà lunga e prudente, con vari passaggi di revisione e tre votazioni da superare a larga maggioranza. Anche se non dovesse ricevere un'ufficializzazione formale, la provocazione di Crutzen ha acceso i riflettori sulla temeraria corsa della specie umana. Nel nostro geologico quarto d'ora di celebrità, ci siamo già fatti notare.

JACOPO PASOTTI

LA SCIENZA IN VETTA

FENOMENI NATURALI, CURIOSITÀ SCIENTIFICHE, MITI DA SFATARE E DOMANDE CHE TUTTI CI SIAMO FATTI, DALLA VETTA A FONDOVALLE: LA FISICA DELLO SCI, LE STRATEGIE DI SOPRAVVIVENZA DI PIANTE E ANIMALI, LA STRAORDINARIA E RAFFINATA COMPLESSITÀ DELLA NEVE... E TANTO ALTRO ANCORA.

UN LIBRO ILLUSTRATO, BELLO DA LEGGERE E DA VEDERE, PER CAPIRE COME MAI LE MONTAGNE SONO COME SONO.

PP. 200 | EURO 16,00

codice EDIZIONI

info@codiceedizioni.it
codiceedizioni.it

facebook.com/in.codice
twitter.com/codice_codice
pinterest.com/codice_codice

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Siamo cavità intestinali evolute?

Lo studio dell'attività genetica dei tessuti embrionali ha risolto un vecchio enigma

Noi animali superiori originiamo da tre foglietti embrionali – e siamo perciò detti Triploblasti – che sono, dal dentro al fuori dell'embrione: endoderma, mesoderma ed ectoderma. È impossibile riassume l'incredibile varietà di processi di sviluppo embrionale delle varie specie, ma i primi eventi morfogenetici sono a carico dell'endoderma in tutte le sue forme, palesi e nascoste, anche se i dettagli minuti di questi processi sono ancora da individuare in molte specie, anche importanti o importantissime.

Gli animali pluricellulari derivano da un'originaria aggregazione di organismi unicellulari e hanno dovuto darsi un'organizzazione propria. Le forme più elementari e probabilmente antiche sono Diploblasti, derivano cioè da due foglietti embrionali: sembra mancare il solo mesoderma che appare quindi come l'ultimo venuto nel cammino dell'evoluzione, ma fra endoderma ed ectoderma chi è il più antico? Siamo una cavità intestinale che si è evoluta ed esternalizzata o un'epidermide che si è internalizzata, acquisendo nuovi compiti?

A questa domanda sembra rispondere un articolo di Tamar Hashimshony e collaboratori (in «Nature», Vol. 519, pp. 219-222) che hanno studiato il profilo dell'attività genica di tessuti embrionali diversi di molte specie, scelte ovviamente tra quelle ritenute più antiche. È sempre arduo cercare di ricostruire il passato partendo dalla situazione presente, soprattutto se la cosa avviene al livello molecolare e puramente trascrizionale. Il verdetto sembra però abbastanza chiaro. Dallo studio delle specie che esistono anche oggi, l'endoderma sembra il foglietto più antico: in principio eravamo intestini.

Forse ciò non è molto sorprendente e già il biologo tedesco Ernst Haeckel aveva proposto nella seconda metà del XIX secolo che siamo tutti evoluti da una sorta di sacco dotato di funzioni digerenti, da lui denominato *gastrea*. È chiaro però che una cosa è ipotizzare e un'altra è dimostrare, soprattutto considerando l'incredibile mole di conoscenze accumulate ultimamente sulle funzioni e i movimenti morfogenetici dei diversi foglietti embrionali nelle differenti specie. È lecito tuttavia discutere tutto questo in un'ottica più ampia e seguendo il filo rosso delle funzioni vitali degli animali pluricellulari.

Prima dei foglietti. Blastocisti umana, lo stadio dello sviluppo embrionale che precede la differenziazione nei tre foglietti.

Un batterio è una macchina per sopravvivere per qualche tempo e per riprodursi, due funzioni parimenti essenziali per qualcosa che vuole definirsi vivo. Anche il batterio è dotato di percezione e reattività, di un'elementare progettualità, e di capacità, anche se limitata, di movimento, tutte funzioni che compie consumando energia e introducendo materia e informazione che poi elabora e metabolizza. Per andare avanti, tutto ciò basta e avanza, come dimostra il fatto che i batteri sono i dominatori della vita sulla Terra. A un certo momento alcuni hanno «preso l'iniziativa» di compiere due passi epocali: una complessa ristrutturazione della loro compagine cellulare, che passa da procariotica, con nucleo cellulare poco evidente, a eucariotica, con nucleo facilmente evidenziabile, e una tendenza ad aggregarsi in tessuti compatti e capaci di funzioni diverse, anche se concorrenti.

Le funzioni biologiche che i nuovi organismi pluricellulari devono compiere sono sempre le stesse, con in testa l'assimilazione e il metabolismo, la riproduzione e la risposta, il più possibile adeguata, alle sollecitazioni dell'ambiente circostante. Se volessimo usare una metafora antropomorfica, potremmo dire che i nuovi organismi, come i vecchi, non hanno altra finalità che «sbarcare il lunario».

In questa ottica l'ambiente è indifferentemente un amico e un nemico, e noi diciamo che un organismo deve essere sempre più adatto al suo ambiente, perché abbiamo un retroterra culturale di stampo finalistico, ma in realtà ogni organismo deve «parare» i colpi dell'ambiente, cosa riuscita su questo pianeta, ma non molto diffusa intorno a noi. Per ottenere questo occorre innanzitutto nutrirsi; poi viene tutto il resto. Con lo sviluppo dell'ectoderma ci si difende e si comunica e infine viene il mesoderma che ci sostiene nel movimento di ogni tipo. Le cavità intestinali originarie potevano quindi anche accontentarsi, ma non l'hanno fatto, fino a voler conoscere il più possibile per arrivare a dominare l'idea stessa di funzione. Siamo quindi arrivati noi che ci «mangiamo» letteralmente tutto il mondo, con corpo e mente. Finché durerà.

Pascal Goetgheluck/SPL/Contrasto

DA 25 ANNI ALLA SCOPERTA DELL'UNIVERSO.

La storia di Hubble, il telescopio spaziale più famoso al mondo.

Il 24 aprile del 1990 NASA ed ESA lanciano a 560 km di altezza un telescopio battezzato col cognome dell'astronomo americano Edwin Hubble, uno strumento capace di trasmettere immagini uniche ad alta definizione e svelare misteri del cosmo che altrimenti sarebbero rimasti ignoti. Una storia lunga 25 anni che National Geographic ci racconta con il contributo dei progettisti che hanno creato uno strumento fondamentale per conoscere e scoprire i segreti dell'universo.

IN EDICOLA

NATIONAL GEOGRAPHIC

www.nationalgeographic.it

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

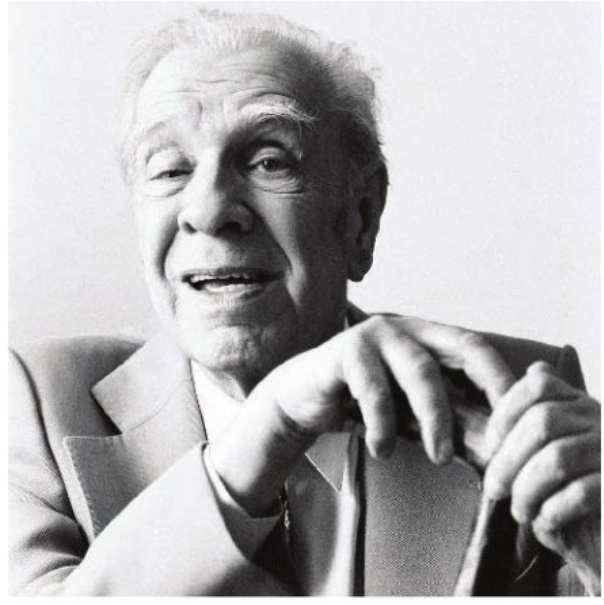
I numeri della letteratura

Joyce e Borges sono stati affascinati dal mondo dei numeri, soprattutto quelli grandi

Nel memorabile racconto *La biblioteca di Babele* (1941), Borges così descrive l'insieme di tutti i libri possibili: «L'universo (che altri chiama la biblioteca) si compone d'un numero indefinito, e forse infinito, di gallerie esagonali, con vasti pozzi di ventilazione nel mezzo, bordati di basse ringhiere. Da qualsiasi esagono si vedono i piani superiori e inferiori, interminabilmente. La distribuzione degli oggetti nelle gallerie è invariabile. A ciascuna parete di ciascun esagono corrispondono cinque scaffali. Ciascuno scaffale contiene trentadue libri di formato uniforme. Ciascun libro è di quattrocentodieci pagine. Ciascuna pagina, di quaranta righe. Ciascuna riga, di quaranta lettere color nero».

Supponendo che l'alfabeto abbia 25 simboli, ciascuno dei quali può essere minuscolo o maiuscolo, e che ci siano 10 segni di interpunzione, il numero dei libri della Biblioteca di Babele è dato dalle possibili combinazioni con ripetizioni dei 60 simboli su 410 × 40 × 40 posti, cioè 60 alla 656.000, pari a circa 10 alla 10 alla 6.

Per scrivere esplicitamente questo numero servirebbero circa 1.166.467 cifre, e dunque quasi due volumi. Per scrivere invece un catalogo dell'intera biblioteca, le cose si complicherebbero: anche supponendo che il titolo di ciascun volume stesse in una sola riga, l'ordine di grandezza del catalogo sarebbe più o meno quello dell'intera biblioteca, visto che il fattore di compressione sarebbe solo il numero di righe in un volume, che è 16.400.



Il libraio di Babele. Lo scrittore argentino Jorge Luis Borges, nato a Buenos Aires nel 1899 e morto a Ginevra nel 1986.

Per quanto stratosferico, il numero dei volumi della biblioteca di Babele è stato ampiamente superato da un numero scoperto nel 2013 dal gruppo Great Internet Mersenne Prime Search (GIMPS), ovvero «grande ricerca su Internet dei primi di Mersenne». In meno di vent'anni il gruppo ha già stabilito una dozzina di volte il record del più grande primo conosciuto. Attualmente è detenuto dal numero scoperto appunto nel 2013, che è 2 alla 57.885.161 meno 1, pari a circa 10 alla 10 alla 7. Per scriverlo servirebbero circa 17.425.169 cifre, e dunque quasi 27 volumi della biblioteca di Babele.

Poiché già Euclide aveva dimostrato che, dato un numero primo di Mersenne M, il numero $M(M+1)/2$ è un numero perfetto (pari, cioè, alla somma dei suoi divisori propri), dal precedente record si ottiene il più grande numero perfetto conosciuto, che è 2 alla 57.885.161 meno 1 moltiplicato per 2 alla 57.885.160, pari a circa 10 alla 10 alla 8.

Borges non era certo l'unico letterato affascinato dai grandi numeri. Un altro era James Joyce, almeno stando a questo passaggio di «Itaca», il diciassettesimo episodio del suo *Ulisse* (1922): «Qualche anno prima, nel 1886, quando era occupato con il problema della quadratura del cerchio, era venuto a sapere dell'esistenza di un numero calcolato con relativo grado di precisione da essere di grandezza tale e di così tante cifre, ad esempio la nona potenza della nona potenza di nove, che una volta ottenuto il risultato, sarebbero stati necessari 33 volumi stampati strettamente di 1.000 pagine, ciascuna ottenuta da innumerevoli risme di carta India, per contenere il racconto completo delle sue cifre stampate di unità, decine, centinaia, migliaia, decine di migliaia, centinaia di migliaia, milioni, decine di milioni, centinaia di milioni, miliardi, il nucleo della nebulosa di ogni cifra di ogni serie contenendo in breve la potenzialità dell'essere elevata all'estrema elaborazione cinetica di qualsiasi potenza di qualsiasi delle sue potenze».

Il numero citato da Joyce è 9 alla 9 alla 9, pari a circa 10 alla 10 alla 8, e per scriverlo servirebbero circa 564 volumi della biblioteca di Babele, parecchio più corti di quelli che aveva mente Joyce.

Se invece di una biblioteca di libri Borges avesse considerato una banca dati universale dei genomi umani, sarebbe arrivato a una cifra ancora più formidabile. Infatti, il genoma umano è costituito da una stringa di circa tre miliardi di nucleotidi, ciascuno scelto da un alfabeto di quattro (A, T, G e C). In questo caso le possibili combinazioni, che corrispondono alla varietà biologica del genere umano, sono addirittura 4 alla 3.000.000.000, pari a circa 10 alla 10 alla 9.

Come si vede, con un po' di fantasia si può facilmente arrivare a immaginare numeri stratosferici, ai quali solo molto raramente si arriva nella pratica matematica.

Isolde Ohlbaum/laif/Contrasto

di Amedeo Balbi
Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Il nostro posto nell'universo

Il telescopio spaziale Hubble ha cambiato radicalmente la nostra visione del cosmo

Sono passati 25 anni dall'inizio delle osservazioni del telescopio spaziale Hubble, uno dei progetti scientifici di maggiore successo di tutti i tempi. Fu lanciato a bordo dello shuttle Discovery il 24 aprile del 1990 ed entrò in orbita il giorno successivo, circa 540 chilometri sopra le nostre teste. Le prime immagini furono inviate a terra il 25 giugno, ma per un po' di tempo il telescopio funzionò al di sotto delle sue potenzialità, per via di un microscopico difetto di fabbricazione nello specchio principale. Ci volle una missione di riparazione, effettuata alla fine del 1993 dagli astronauti dello shuttle Endeavour, per rimettere a posto le cose. Da quel momento in poi, Hubble ha funzionato a pieno regime, inanellando una serie impressionanti di scoperte e contribuendo pesantemente a cambiare la nostra visione dell'universo.

Il principale obiettivo scientifico del telescopio spaziale, il *cosiddetto key project*, era la misurazione accurata del tasso di espansione dell'universo, un programma di ricerca iniziato nei primi decenni del XX secolo proprio dall'astronomo che ha dato il nome all'osservatorio orbitale, Edwin Hubble.

Il telescopio spaziale ha tuttavia fatto molto altro, mettendo insieme un bagaglio di conoscenze enorme, testimoniato da oltre 13.000 pubblicazioni scientifiche. Ha guardato dentro le nubi di gas da cui nascono le stelle, e nelle nubi che le stelle si lasciano dietro quando terminano violentemente la loro esistenza. Ha osservato i pianeti del nostro sistema solare, ma anche i pianeti che orbitano attorno alle altre stelle e della cui esistenza, quando Hubble fu lanciato, ancora non c'erano le prove. Ha studiato buchi neri e quasar, ha mappato la distribuzione su grande scala della materia oscura, ha contribuito a scoprire l'inattesa accelerazione dell'espansione dell'universo e poi a investigare la misteriosa energia oscura che ne è la causa più probabile. E nel fare questo ha anche regalato a tutti quanti noi, esperti e semplici appassionati, squarci di stupefacente bellezza sul cosmo in cui viviamo.

Lo sterminato catalogo di Hubble contiene oltre un milione di immagini, alcune delle quali potrebbero essere tranquillamente esposte nelle migliori gallerie d'arte del mondo e ammirate per semplice godimento estetico. Ognuna di quelle immagini però ci racconta anche qualcosa della natura spesso sconcertante dell'universo in cui viviamo.

Se dovessi scegliere la più significativa, da parte mia non avrei molti dubbi. Sarebbe l'Hubble Deep Field, una foto di una minuscola e apparentemente insignificante regione di cielo, grande quanto un granello di sabbia visto da un metro di distanza. Osservato per una durata complessiva di diversi giorni, da quel chicco di buio sono a poco poco sbucati fuori migliaia di puntini luminosi: non stelle, ma galassie, ognuna contenente centinaia di miliardi di stelle, talmente lontane che la loro luce ha viaggiato per quasi tutta la vita dell'universo, diventando miliardi di volte più fioca di quanto un occhio umano possa osservare. Una seconda immagine raccolta in modo analogo, ma nell'emisfero sud, ha mostrato lo stesso spettacolo. Ne sono poi seguite altre che hanno scavato ancora più in profondità: Ultra Deep Field ed eXtreme Deep Field, ognuna delle quali ha rivelato galassie sempre più distanti, a migliaia, sfuggite alle osservazioni precedenti.

Se si pensa che l'osservazione di qualunque altra regione di cielo delle stesse dimensioni, in qualunque direzione, darebbe un risultato simile, si ha una dimostrazione lampante della ricchezza del cosmo, della sua vertiginosa vastità nel tempo e nello spazio e, di riflesso, anche del nostro posto in tutto questo: temporaneo e marginale, e quindi forse ancora più prezioso.

La straordinaria immagine dell'Ultra Deep Field, in cui compaiono quasi 10.000 galassie, corrisponde a un piccolo angolo di cielo, appena un decimo del diametro della Luna piena.

Cortesia NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) e HUDF Team

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Il valore delle differenze

La variabilità delle specie estinte è difficile da studiare ma è uno strumento potente

Voler studiare le differenze di taglia corporea fra specie diverse di ominidi fossili, o (addirittura) al loro interno, è una sfida tanto interessante quanto problematica. È interessante perché ci consente di affrontare lo studio dell'evoluzione umana in termini di biologia ed ecologia delle specie estinte; è difficile perché la documentazione fossile raramente ci viene incontro su questo terreno, essendo parecchio frammentaria e diluita nel tempo.

Ne parlavo proprio pochi giorni fa con gli studenti e, neanche a farlo apposta, nel frattempo sono apparsi un paio di articoli (sulle pagine di «PeerJ» e su quelle del «Journal of Human Evolution», rispettivamente) che cercano di fare luce su questo tema con riferimento ad *Australopithecus afarensis*, in un caso, e alla varietà dei più antichi rappresentanti del genere *Homo*, nell'altro.

Riguardo ad *A. afarensis*, la specie della celebre Lucy, una specie che copre un ampio intervallo cronologico grosso modo compreso fra quattro e tre milioni di anni fa, si riapre una disputa mai sopita. Ovvero, se quella sia stata o meno una specie molto variabile per taglia degli individui e se questo sia fondamentalmente da ricondursi a un marcato dimorfismo sessuale. Che le cose stessero così e che, dunque, i maschi di *A. afarensis* fossero molto più grandi delle loro femmine (fra le quali ci sarebbe la stessa Lucy), era una conclusione suggerita da diversi indicatori. Fra essi c'è l'insieme dei fossili attribuiti a questa specie, in particolare quelli di almeno una dozzina di individui che si ritiene siano stati vittime di uno stesso evento drammatico (la cosiddetta «prima famiglia»: quasi 250 fossili trovati ad Hadar, in Etiopia, e siglati collettivamente AL 333), o c'è anche la formidabile pista di impronte scoperta a Laetoli, in Tanzania, da cui si evince la contemporanea presenza di individui di taglia molto diversa, fra cui (forse) un maschio e una femmina.

Se le cose stessero davvero così, si potrebbe ipotizzare una struttura sociale dei nostri antenati simile a quella dei gorilla, caratterizzata da competizione fra i maschi per la riproduzione e da gruppi familiari ad «*harem*», con un maschio dominante e un certo numero di femmine a sua... disposizione. Il nuovo studio però, basato sul maggior numero di reperti oggi disponibili e sul confronto fra un paio di raffinati metodi di analisi statistica, sembrerebbe suggerire invece che *A. afarensis* era una specie con variazioni di taglia tali da non indicare un marcato dimorfismo sessuale, ma una condizione simile a quella degli scimpanzé o alla nostra.

Tutto da ripensare, allora? Ho l'impressione ci sia bisogno di saperne di più e studiare ancora.

L'altra ricerca riguarda i primi rappresentanti del genere *Homo*, che troviamo sempre in Africa in un'epoca successiva, intorno a due milioni di anni fa (fra 2,4 e 1,5). È opinione condivisa che la specie più tarda, cioè *H. ergaster*, avesse una taglia corporea più grande rispetto alle specie più antiche, *H. habilis* e *H. rudolfensis*, e che questo possa essere stato un fattore decisivo per la prima diffusione fuori dall'Africa da parte di questi nostri remoti antenati (ai tempi, appunto, di *H. ergaster*).

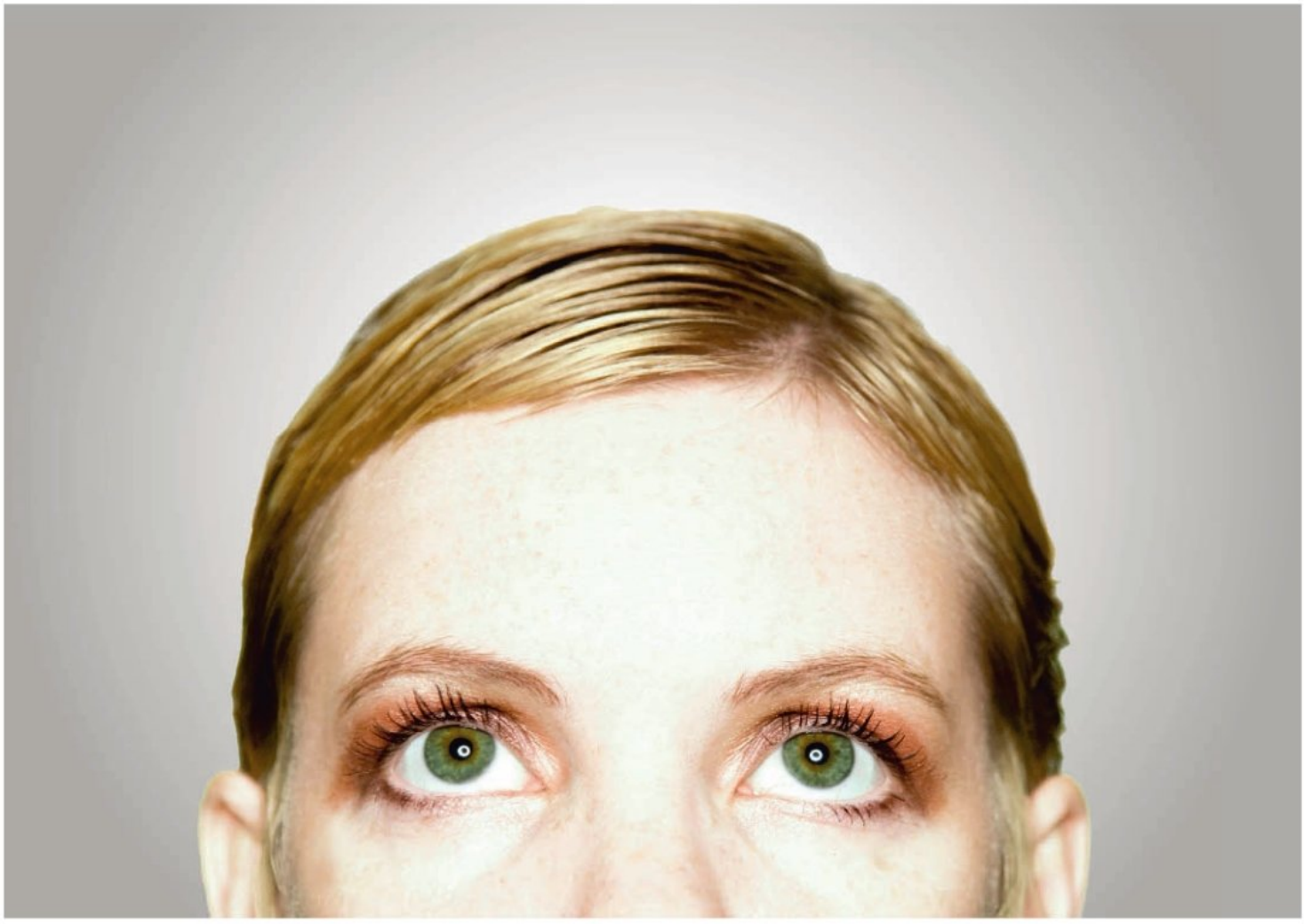
Per rendere confrontabili fra loro elementi scheletrici disparati, gli autori del nuovo studio hanno applicato equazioni di regressione ai dati disponibili dai fossili. I risultati hanno mostrato una notevole variabilità di taglia, ma nessuna chiara tendenza nel tempo o nella distribuzione geografica. Sembrerebbe di poter concludere quindi che se la taglia ha avuto un ruolo nella diffusione extra-africana dei primi *Homo*, non si è trattato di un adattamento direzionale e contestuale alla diffusione, ma di una sorta di preadattamento, ovvero un'*exaptation*, che poggiava sulla variabilità preesistente.

Foto di famiglia. Questi modelli in silicone basati sui reperti fossili rappresentano le diverse specie dei nostri antenati e parenti estinti, ma anche la variabilità interna alle stesse specie.

P. Plailly/E. Daynes/SPL/Contrasto

AcademiaNet

Expert Database of Outstanding Female Academics



AcademiaNet is a unique service for research facilities, journalists and conference organisers searching for outstanding female academics with boardroom experience and management skills on top of their excellent qualifications.

AcademiaNet, the European expert database of outstanding female scientists, offers:

:: Profiles of highly qualified female researchers from every discipline – nominated by renowned scientific organisations and industry associations
:: Customised search options according to discipline and area of expertise
:: Current news about »Women in Science«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

An initiative of the Robert Bosch Stiftung in cooperation with Spektrum der Wissenschaft and Nature Publishing Group

www.academia-net.org

Y&R

Oggi puoi leggere
Le Scienze direttamente su iPad.

La nuova applicazione disponibile sull'edicola Newsstand di iPad.

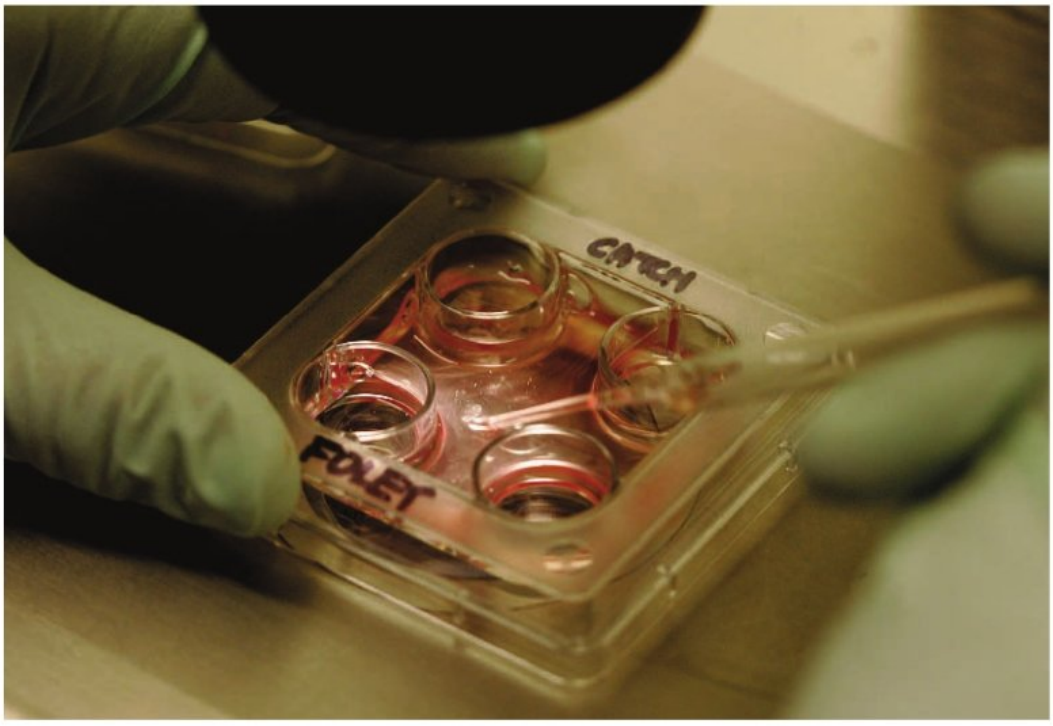
Porta Le Scienze sempre con te. Scarica l'applicazione sul tuo iPad e sfoglia i migliori approfondimenti su scienza, tecnologia ed innovazione. Scegli l'abbonamento che preferisci e leggi la rivista in prova gratuita per 1 mese.

Le Scienze

GENETICA

Modificare o no gli embrioni?

L'applicazione di una potente tecnica di ingegneria genetica solleva quesiti etici



Sandy Huffaker/Corbis

In piastra. Embrioni in piastre di Petri, in un laboratorio per la fecondazione in vitro a La Jolla, in California. L'esperimento reso noto da ricercatori cinesi, in cui è stato modificato il patrimonio genetico di embrioni non adatti alla riproduzione, non esclude che in futuro la stessa operazione non possa essere usata per modificare a piacimento il genoma del nascituro.

Fra gli addetti se ne vociferava da tempo, probabilmente su soffiata di qualche revisore che aveva esaminato il lavoro. Su «Nature» e «Science» erano comparsi appelli alla cautela. E infine, il 18 aprile, la pubblicazione è arrivata. Su «Protein&Cell» (rivista minore pubblicata da Springer e dal Ministero dell'istruzione cinese), un gruppo cinese guidato da Junjiu Huang, della Sun Yat-sen University di Guangzhou, ha pubblicato il primo tentativo di manipolare geneticamente un embrione umano.

Senza alcuna intenzione – va detto subito – di farci nascere un bambino: si trattava di embrioni difettosi prodotti per la procreazione assistita ma che, per un eccesso di cromosomi, non avrebbero mai potuto svilupparsi a termine. Lo scopo era provare una nuova tecnica, la cosiddetta CRISPR-Cas9, per introdurre modifiche mirate in un gene; in questo caso un gene per l'emoglobina la cui correzione potrebbe prevenire la beta talassemia. Ma la prova tecnica non è riuscita granché. Dopo due giorni, su 86 embrioni trattati, solo in quattro il gene è stato corretto, e anche in questi solo in alcune cellule. Peggio, la tecnica si è mostrata molto meno precisa che in altri sistemi: gli embrioni avevano molte mutazioni indesiderate in altri geni.

Anche solo per questo, conclude Huang, pensare di correggere con la tecnica CRISPR i difetti genetici umani è prematuro. Ma, come si diceva, ancora prima della pubblicazione il lavoro ha sollevato un putiferio. Per ora tutti concordano che anche se la tecnica funzionasse non bisognerebbe applicarla sull'essere umano prima di averla discussa a fondo e regolamentata. Molto più controverso è se debbano proseguire gli studi di base.

A detta di Huang la ricerca ha superato il vaglio del comitato etico locale ed è in linea con le norme cinesi e internazionali, ma nondimeno era stata respinta da «Nature» e «Science» proprio su basi etiche. Mentre l'appello su «Science», con primo firmatario David Baltimore, del California Institute of Technology a Pasadena, chiedeva solo di non arrivare ad applicazioni cliniche, quello su «Nature», promosso da Edward Lanphier, CEO dell'azienda Sangamo BioSciences a Richmond in California, chiedeva anche una moratoria di ogni ricerca al riguardo.

Dopo la pubblicazione i commenti continuano a dividersi su queste due linee, fra chi ammonisce a non perfezionare le tecnologie prima di averne stabilito usi e salvaguardie, invito sottoscritto dalla Society for Developmental Biology, e chi rimarca che esplorare le possibilità della tecnica è essenziale per decidere il da farsi. Linea sottoscritta ovviamente da Huang e da «Protein&Cell».

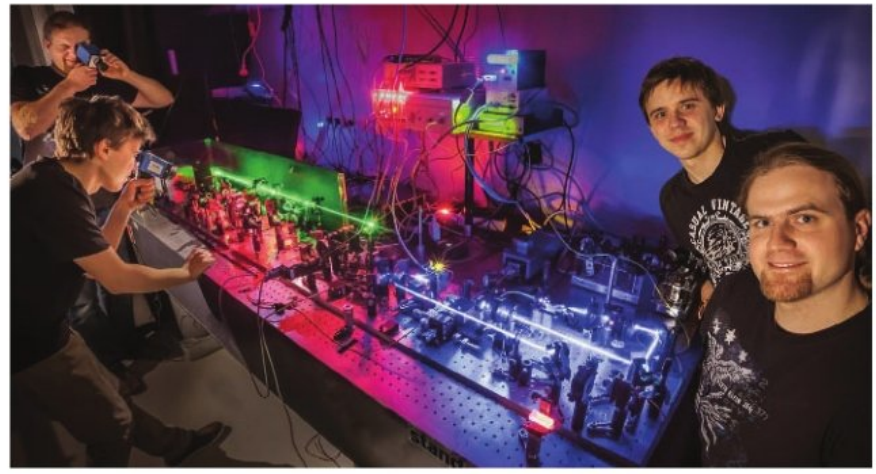
Del resto, per fermarsi potrebbe essere tardi: fonti cinesi hanno dichiarato a «Nature» che almeno quattro gruppi lavorano già a esperimenti simili.

Giovanni Sabato

FISICA

Paparazzi del mondo dei quanti

Filmati per la prima volta fotoni coinvolti nell'interferenza di Hong-Ou-Mandel



Nel mondo quantistico, essere unici significa esser soli. Solo i fotoni indistinguibili possono infatti «accoppiarsi» fra loro, in base a un fenomeno quantistico molto difficile da osservare, noto come interferenza di Hong-Ou-Mandel. Ora però, grazie a un rivelatore innovativo, un gruppo dell'Università di Varsavia è riuscito a filmare per la prima volta i fotoni coinvolti nel fenomeno. Il nuovo dispositivo, simile agli intensificatori di luce notturna, ha reso possibile cioè «paparazzare» i due fotoni, sottolineano scherzosamente i ricercatori. Il risultato, pubblicato su «Optics Letters», è un importante passo avanti verso lo sviluppo di metodi efficienti per rilevare stati quantici della luce e per costruire nuovi supermicroscopi capaci di funzionare anche con pochissimi fotoni.

L'interferenza di Hong-Ou-Mandel fu prevista alla fine degli anni ottanta all'Università di Rochester e osservata successivamente con un apparato sperimentale basato su un *beam splitter*, uno schermo semitrasparente che trasmette una parte della luce e riflette il resto. L'apparato permette di trasmettere solo metà della luce, e un fotone ha quindi il 50 per cento di probabilità di trasmissione. Se due fotoni sono inviati ai lati del beam splitter si creano quattro situazioni: entrambi i fotoni sono riflessi; entrambi trasmessi; due casi in cui uno è trasmesso e l'altro riflesso.

Il fenomeno evidenzia il dualismo quantistico onda-particella, a cui obbediscono anche i fotoni. Questi scenari si verificano solo se i fotoni sono resi distinguibili, per esempio identificandoli con la polarizzazione. In caso contrario, i due fotoni sono indistinguibili e interferiscono, «accoppiandosi» ed emergendo solo da un lato del beam splitter. È proprio questo l'effetto osservato a Varsavia, grazie a una specie di amplificatore di luce così sensibile da rivelare i singoli fotoni. Con l'effetto Hong-Ou-Mandel si aprono nuovi scenari dove è possibile filmare in diretta i fenomeni quantistici sui singoli fotoni. L'era dei paparazzi quantistici è iniziata.

Massimiliano Razzano

Ghiaccio cubico grazie al grafene

Non si tratta di un semplice cubetto di ghiaccio, bensì di una nuova forma di reticolo cristallino assunta dalle molecole d'acqua. È stata scoperta da Gerardo Algara-Siller e Ossi Lehtinen, dell'Università di Ulm, i quali per la prima volta hanno osservato uno stato solido dell'acqua in cui la struttura reticolare è dotata di simmetria cubica, conformazione finora prevista solo a livello teorico.

Il fenomeno, descritto su «Nature», è stato scoperto in una goccia inserita tra due fogli di grafene sottoposti a una pressione elevata. Malgrado la loro semplicità, il comportamento delle molecole d'acqua è fra i più complessi che si conoscano. Il ghiaccio può infatti assumere numerose forme, dalla fase amorfa a svariate strutture cristalline, per esempio il reticolo esagonale tipico dei fiocchi di neve. Normalmente però il passaggio allo stato solido avviene a temperature inferiori allo zero. La struttura cristallina cubica identificata da Algara-Siller e Lehtinen, invece, si può formare a temperatura ambiente, a provare che il comportamento delle molecole costrette in volumi microscopici possa cambiare radicalmente rispetto a quello osservato in condizioni macroscopiche ordinarie.

Le immagini ottenute con il microscopio elettronico ad alta risoluzione mostrano che il «ghiaccio cubico» è composto da pacchetti ad alta densità di reticoli con dimensioni nanometriche regolari, assemblati in strati doppi o tripli. Gli scienziati ritengono che un comportamento analogo, oltre che tra due fogli di grafene, potrebbe manifestarsi anche nel passaggio attraverso nanotub. Quindi la scoperta potrebbe aiutare a capire il comportamento dell'acqua nelle strutture nanoporose delle membrane biologiche, in cui il confinamento idrofobico svolge un ruolo fondamentale. Lo studio rientra nell'ambito del progetto europeo Graphene Flagship, partito nel 2013.

Marina Semiglia

Cortesia UW Physics, R. Chrapkiewicz (*ricercatori e apparato per misurazioni quantistiche*); Topic Photo Agency/Corbis (*cubi di ghiaccio*)

ASTROFISICA

Troppi antiprotoni nei raggi cosmici

L'esperimento AMS ha rilevato un anomalo eccesso di queste particelle alle alte energie

Nasa/handout/dpa/Corbis

Nel flusso di raggi cosmici in arrivo verso il nostro pianeta c'è un eccesso di antiprotoni ad alta energia. È il risultato di recenti misurazioni condotte dall'Alpha Magnetic Spectometer (AMS), il rivelatore di antimateria montato a bordo della Stazione spaziale internazionale e operativo dal 2011. Ad annunciarlo è stata la collaborazione internazionale di ricercatori che opera sui dati di AMS, in una tre giorni al CERN di Ginevra appositamente dedicata all'analisi delle ricerche condotte da questo rivelatore, alla cui realizzazione e gestione contribuisce anche l'Italia attraverso l'Istituto nazionale di fisica nucleare e l'Agenzia spaziale italiana.

Questa scoperta va ad aggiungersi a quella annunciata a settembre 2014 di un'analoga osservazione relativa ai positroni, le antiparticelle degli elettroni. Già in quella occasione i ricercatori della collaborazione avevano proposto l'esistenza di processi fisici fondamentali che coinvolgono la materia oscura – per esempio l'annichilazione fra particelle e antiparticelle di materia oscura – come possibile interpretazione di questo eccesso di antimateria ad alta energia: l'eccesso osservato di positroni sarebbe quindi una rilevazione indiretta di questo tipo di materia. L'osservazione dell'eccesso di antiprotoni molto energetici (oltre qualche centinaio di gigaelettronvolt, o GeV; 1 GeV è pari a 1 miliardo di elettronvolt) sembra dunque corroborare questa ipotesi, perché non può essere spiegato con gli attuali modelli riguardanti la produzione di raggi cosmici ad alta energia. Le collisioni fra i raggi cosmici e il mezzo interstellare sono infatti in grado di produrre antimateria, ma non nella quantità osservata negli intervalli ad alta energia.

I ricercatori però non possono confermare che questo eccesso provenga in effetti da processi che coinvolgono la materia oscura, dato che a produrrelo potrebbero essere nuove sorgenti astrofisiche oppure meccanismi ancora ignoti di accelerazione e propagazione dei raggi cosmici nello spazio interstellare. Per escludere queste ipotesi occorre attendere misure a energie ancora maggiori. Ma AMS ha tempo: lavorerà fino al 2024.

Emiliano Ricci

L'inattesa rivincita dei fononi

Finora non c'era un metodo semplice ed economico per alterare la conducibilità termica di un materiale, e nemmeno una maniera per controllare in modo efficiente i fononi, i pacchetti di vibrazioni all'interno di un solido. Ma grazie a una nuova ricerca dei Sandia National Laboratories di Albuquerque, negli Stati Uniti, i fononi possono ora essere addomesticati e usati per trasportare energia e cambiare la conducibilità termica di un corpo. Sfruttando una lega di titanato di zinco e piombo (PZT), i ricercatori ne hanno infatti alterato la conducibilità applicando un campo elettrico esterno con una batteria da 9 volt (quelle per uso domestico a forma di parallelepipedo). La ricerca, apparsa su «Nano Letters», offre prospettive tecnologiche interessanti: oltre al controllo attivo della conducibilità termica nei dispositivi elettronici, sfruttando i fononi si potrebbero sviluppare nuove tecnologie analoghe all'elettronica e all'ottica, basate rispettivamente sul trasporto di elettroni e fotoni. Il PZT è un materiale piezoelettrico, capace cioè di generare differenze di potenziale per deformazione meccanica. I ricercatori hanno scoperto che un campo elettrico altera la struttura delle interfacce interne al materiale, che controllano la trasmissione dei fononi, cambiando così la conducibilità del calore.

Massimiliano Razzano

BIOLOGIA

Tandem batterico da alimentazione

Batteri di specie diverse possono funzionare come un'unica entità per scambiarsi nutrienti

Se privati di un nutriente essenziale, batteri di specie diverse possono collegare i loro citoplasmi e scambiarsi i nutrienti mancanti, o mettere in comune i macchinari molecolari per usare quelli disponibili, funzionando come un'entità unica. Lo mostrano due studi su «Nature Communications».

Christian Kost, del Max-Planck-Institut für chemische Ökologie di Jena, ha modificato geneticamente due specie distanti, *Escherichia coli* e *Acinetobacter baylyi*, rendendo l'uno incapace di produrre l'amminoacido istidina ma superproduttore di triptofano, e l'altro viceversa. In assenza di questi amminoacidi, *E. coli* si collega tramite nanotubi ad *Acinetobacter* e le due specie scambiano i nutrienti riprendendo entrambe a crescere. La cooperazione tra i due batteri si interrompe appena si aggiungono alla coltura gli amminoacidi mancanti.

Marie-Thérèse Giudici-Orticoni, dell'Università di Aix-Marsiglia, ha mostrato invece che un batterio incapace di usare il glucosio (*Desulfovibrio vulgaris*), in un mezzo in cui non trova i propri nutrienti, si collega a uno che sfrutta lo zucchero (*Clostridium acetobutylicum*), acquisendo anch'esso la capacità di metabolizzarlo. «Si sapeva che i batteri si collegano per scambiare DNA o coordinare attività sociali, ma il trasferimento diretto di nutrienti era un'area pressoché inesplorata», ha osservato Kost.

Giovanni Sabato

Quando due specie diventano una

Con i progressi della microscopia e del sequenziamento genico, organismi simbionti che vivono all'interno di altri (endosimbionti) sono stati scoperti in tutti i meandri del regno animale e vegetale, ed è emerso quanto possa divenire profonda l'integrazione fisica, metabolica e genomica. Nelle cicale si sono trovati simbionti differenziatisi in nuove specie dentro l'ospite. Alcuni simbionti ospitano a loro volta un simbionte interno. E i vermi marini *Paracatenula* dipendono da batteri simbionti al punto da aver perso bocca e tratto digerente, mentre il batterio ha perso quasi ogni altra funzione, il grosso del genoma e la vita libera, e si trasmette dai genitori alla progenie. Svolte decisive nella storia della vita, dall'origine dei cloroplasti alla pluricellularità, sono avvenute quando comunità di simbionti hanno perso autonomia integrandosi in un nuovo organismo. Ma quando si può considerare avvenuto questo raro passaggio?

Alcuni dibattiti si concentrano su quanto i batteri endosimbionti somiglino o meno agli organuli cellulari. Ma Toby Kiers, della Libera Università di Amsterdam, e Stuart West, dell'Università di Oxford, propongono su «Science» una visione più proficua: quella delle grandi transizioni evolutive avanzata anni fa dagli evoluzionisti John Maynard Smith ed Eörs Szathmáry, che considera le dinamiche evolutive in gioco. La fusione si compierà se gli interessi dei partner sono allineati. Contano come sempre geni e ambiente. Se i benefici variano con il contesto, per esempio, le specie resteranno indipendenti, come per i batteri radicali delle leguminose, di scarso aiuto nei terreni ricchi d'azoto. Se il simbionte è geneticamente omogeneo, come nei casi di trasmissione diretta alla progenie, gli interessi saranno più allineati, mentre se il batterio è acquisito dall'ambiente la fitness dei vari individui sarà più legata alla competizione fra loro e meno a quella dell'ospite. «Quest'ottica permetterà di capire l'evoluzione della complessità degli organismi in una cornice unificata genomica ed evolutiva», affermano i due.

Giovanni Sabato

Il segreto dell'invasività è la variabilità

Le invasioni biologiche, spesso determinate dalla diretta immissione di specie aliene da parte dell'uomo, sono considerate una delle principali cause dell'attuale perdita di biodiversità, seconda solo alla distruzione degli ambienti naturali. Sebbene si conoscano decine di casi di specie aliene che hanno causato l'estinzione diretta di molte specie locali, si stima che solo una specie su 1000 che approda in un nuovo ambiente diventi poi invasiva. Che cosa determina la capacità di una specie di colonizzare un ambiente nuovo con successo? In pratica, che cosa consente a una specie aliena di diventare invasiva?

Uno studio su «The American Naturalist» ha mostrato che una delle caratteristiche fondamentali per proliferare con successo in un ambiente nuovo è l'estrema variabilità intraspecifica, sia morfologica sia genetica, dato che questa caratteristica conferisce maggiori probabilità di sopravvivere e adattarsi a condizioni ecologiche differenti da quelle dell'habitat di provenienza. Questa conclusione giunge grazie all'analisi di 511 eventi di colonizzazione da parte di 97 specie di mammiferi in tutto il mondo. La scoperta getta ora le basi per lo sviluppo di misure di contenimento delle specie invasive e soprattutto per la prevenzione di possibili future invasioni biologiche.

Andrea Romano

Corbis

GENETICA

Un OGM naturale

Il DNA delle patate dolci contiene geni del batterio *Agribacterium*

Imaginechina/Corbis (*patate*); Michael Runkel/Robert Harding World Imagery/Corbis (*gorilla di montagna*)

La patata dolce potrebbe essere il più antico e l'unico finora noto esempio di organismo geneticamente modificato (OGM) «biologico». Un gruppo di ricercatori dell'Università di Gand e dell'International Potato Center di Lima hanno identificato geni alieni nel genoma della patata dolce. Queste sequenze di DNA sarebbero entrate nel DNA della patata, specie largamente diffusa nel mondo e importante dal punto di vista alimentare, attraverso un meccanismo analogo, ma del tutto naturale, a quello usato dai biotecnologi per creare gli OGM.

I ricercatori stavano conducendo un'analisi sul genoma della patata dolce per possibili malattie virali quando hanno osservato la presenza di sequenze di DNA di *Agrobacterium*, una famiglia di batteri che causa tumori nelle piante. Quindi hanno deciso di approfondire la questione, e successivamente hanno identificato questi stessi geni in tutti le 291 varietà di patata presi in esame, oltre che in alcune specie selvatiche imparentate. Gli scienziati hanno anche dimostrato che queste sequenze genetiche sono attive e che dunque potrebbero portare caratteristiche che sono state poi selezionate positivamente dagli agricoltori.

Secondo gli autori della scoperta, pubblicata sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», gli indizi portano a ipotizzare che si tratti di un effettivo trasferimento genico «orizzontale» (da specie a specie, opposto a quello verticale che avviene tra esemplari della stessa specie attraverso la riproduzione). *Agrobacterium* è infatti noto per la sua capacità di trasferire i suoi geni, in particolare una sezione di DNA denominata T-DNA, proprio quello trovato nella patata dolce, nelle cellule di diverse specie di piante.

In genere questo batterio riesce a trasferire geni solo in una ristretta porzione delle cellule di una pianta, ma in questo caso, proprio come avviene per gli OGM in laboratorio, la cellula con il DNA inserito riesce a moltiplicarsi e a formare un intero nuovo esemplare, generando una progenie di individui che recano il DNA alieno. Questo, secondo gli autori, dimostra che la modifica genetica avviene anche in natura.

Federica Sgorbissa

I vantaggi dell'inbreeding nel gorilla

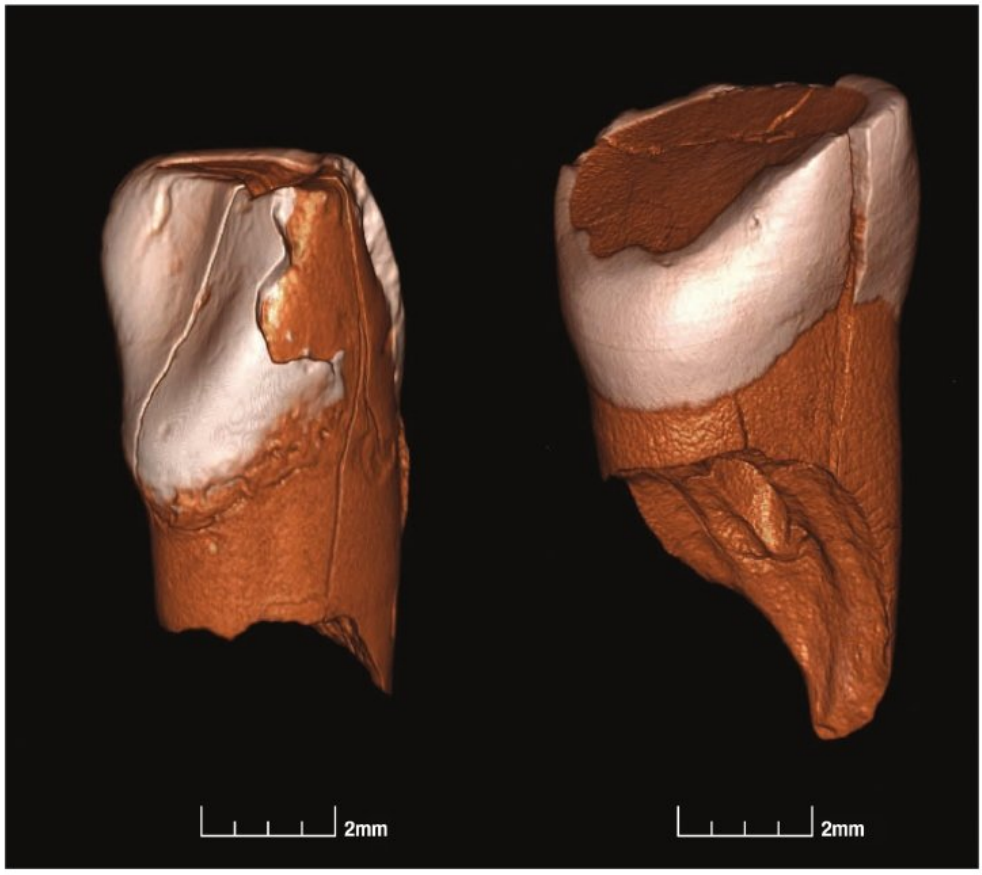
L'inbreeding, o incrocio tra individui strettamente imparentati, rappresenta una seria minaccia per molti animali in via di estinzione. Ma non per i gorilla di montagna, secondo una ricerca pubblicata su «Science». Il sequenziamento del genoma di sette esemplari provenienti dai Monti Virunga, al confine tra Ruanda, Uganda e Repubblica Democratica del Congo, ha rivelato che la loro variabilità genetica è da due a tre volte inferiore a quella dei gorilla che vivono in gruppi più grandi nelle regioni occidentali dell'Africa centrale.
L'elevata consanguineità è il risultato non solo della drastica riduzione della popolazione, ma anche della vita in piccoli gruppi. L'inbreeding ha caratterizzato la specie per decine di migliaia di anni senza provocare particolari problemi, anzi, portando benefici come la scomparsa di varianti genetiche dannose che invece affliggono le popolazioni più numerose. Buone notizie, quindi, per i circa 500 gorilla di montagna che attualmente vivono sui Monti Virunga. Anche perché con la nuova mappa genomica sarà più facile risalire alla popolazione dei gorilla catturati illegalmente e riportarli nel luogo di provenienza.

Eugenio Melotti

PALEOANTROPOLOGIA

L'alba di *Homo sapiens* in Europa

La cultura proto-aurignaziana sarebbe tipica dell'uomo anatomicamente moderno



I tempi e le modalità della transizione biologica e culturale che avvenne in Europa Occidentale tra 45.000 e 35.000 anni fa sono tuttora oggetto di acceso dibattito tra i paleoantropologi e i paleoarcheologi. In questo periodo, gli uomini di Neanderthal furono infatti sostituiti nel continente europeo dagli uomini anatomicamente moderni provenienti dall'Africa e comparve una serie di diverse culture paleolitiche, che vengono definite «di transizione». Tra queste, la cultura proto-aurignaziana si impose nell'Europa meridionale intorno a 40.000 anni fa ed è al centro degli studi sull'arrivo delle popolazioni di *Homo sapiens* in Europa e sulle sue prime interazioni con i Neanderthal.

Secondo uno studio quasi tutto italiano pubblicato su «Science», questa cultura non sarebbe probabilmente da attribuire ai Neanderthal, come si credeva, bensì all'uomo anatomicamente moderno. Questa è la conclusione di minuziose analisi con tecniche di microtomografia computerizzata di due denti, risalenti a circa 41.000 anni fa e rinvenuti nelle grotte di Fumane, in provincia di Verona, e di Riparo Bombrini, in provincia di Imperia, siti associati alla produzione litica proto-aurignaziana. Le analisi dello smalto dei denti mostrano infatti in modo univoco che questi appartenevano a *Homo sapiens*. Questo risultato viene confermato anche dal sequenziamento del DNA mitocondriale estratto da uno dei denti e dal suo confronto con diverse specie di ominidi bipedi e altri primati.

Non solo la cultura aurignaziana, caratterizzata da produzione litica complessa, da rappresentazioni figurative e dalle famose opere d'arte rupestre, ma anche quella proto-aurignaziana, più semplice e contraddistinta da una sola tecnica di scheggiatura e dalla realizzazione di utensili meno elaborati, sarebbe esclusiva della nostra specie. Dal momento che gli uomini di Neanderthal scomparvero dall'Europa Occidentale proprio in quel periodo, intorno a 39.000 anni fa, è possibile che l'avvento di questa cultura possa aver contribuito a scatenare il lento declino di questi nostri stretti cugini.

Andrea Romano

Il ritorno del brontosauro

Brontosauro o apatosauro? La domanda ha appassionato per oltre un secolo i paleontologi e gli amanti dei dinosauri, fin da quando, nel 1903, gli studiosi ritennero che le differenze tra i fossili di questi grandi sauropodi erbivori non fossero abbastanza ampie da consentire l'istituzione di due generi separati.

Per le regole della tassonomia scientifica, che prevedono che in caso di attribuzione di più nomi alla stessa entità biologica venga considerato valido quello proposto alla prima descrizione, il termine *Brontosaurus* venne quindi messo da parte. I fossili di brontosauro furono infatti rinvenuti e descritti alcuni anni dopo quelli di apatosauro, e il famoso *Brontosaurus excelsus* divenne così *Apatosaurus excelsus*.

Oggi però il genere *Brontosaurus* potrebbe tornare a essere utilizzato in maniera ufficiale dai paleontologi.

La riabilitazione del nome di questo dinosauro viene da un'approfondita analisi filogenetica della famiglia dei Diplodocidae, condotta a livello di individuo grazie all'uso di 477 tratti anatomici di tutti i reperti fossili finora noti.

I risultati, pubblicati sulla rivista «PeerJ», suggeriscono infatti che i fossili attribuiti al genere *Apatosaurus* sarebbero meglio classificabili in due categorie tassonomiche differenti, reintroducendo quindi il genere *Brontosaurus*.

Andrea Romano

Daniele Panetta, Istituto di fisiologia clinica del CNR di Pisa/Science; a fronte: Bruno Ehrs/Corbis (*Agrigento*); Percy Felinstein/Corbis (*fracking*)

CLIMA

Quanto soleggiamento nel Paese del Sole?

Disponibile per la prima volta una stima delle ore di Sole negli ultimi 80 anni in Italia

Quando si parla del clima di un paese si pensa quasi esclusivamente all'andamento della temperatura e delle precipitazioni. In realtà, però, il clima di una certa zona è determinato anche dai valori di altre grandezze, per esempio il soleggiamento e la quantità di nuvolosità. Solo negli ultimi anni gli studi di climatologia storica hanno cominciato a esplorare grandi insiemi di dati relativi a queste grandezze. E oggi, per la prima volta, abbiamo una stima della durata giornaliera del soleggiamento in Italia negli ultimi 80 anni. Infatti, Veronica Manara, del Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano, e colleghi hanno analizzato i dati di oltre 100 stazioni meteorologiche italiane attrezzate con strumenti a soglia per la misura delle ore di sole giornaliere: il loro studio è appena stato pubblicato sul «Journal of Geophysical Research».

I ricercatori hanno osservato anzitutto che il soleggiamento al nord e al sud d'Italia ha avuto andamenti abbastanza diversi nel corso degli anni. Nonostante questo, una tendenza comune all'aumento delle ore di soleggiamento si è avuta in tutto il paese a partire dagli anni ottanta del Novecento. Dagli anni cinquanta agli ottanta, invece, le ore di soleggiamento erano andate un po' diminuendo. È importante capire se questi andamenti siano dovuti alla presenza più o meno importante della nuvolosità.

In generale si trova un'ovvia anticorrelazione tra soleggiamento e nuvolosità, ma quest'ultima non spiega tutti i dati di soleggiamento. Un'influenza importante sembra sia dovuta anche alla presenza di polveri in atmosfera, più forte negli anni di intenso sviluppo economico della nazione. Questo fenomeno può spiegare in parte la diminuzione del soleggiamento avvenuta tra gli anni cinquanta e gli anni ottanta, quando ancora misure di contenimento dell'inquinamento atmosferico non erano adottate.

Ovviamente, questo studio pone le basi osservative anche per cercare di simulare l'andamento futuro del soleggiamento, importante per tante applicazioni, tra cui lo sfruttamento dell'energia solare nel nostro «Paese del Sole».

Antonello Pasini

Fracking e terremoti in Oklahoma

L'Oklahoma è diventato una regione ad alto rischio sismico a causa dell'estrazione di petrolio tramite il cosiddetto *fracking*. Nel 2014, lo Stato ha registrato 15 scosse superiori a magnitudo 4: più di quelle registrate in un secolo di attività sismica normale, e il doppio della California, Stato a rischio sismico per eccellenza. Nel 2011 un terremoto di magnitudo 5,6 indotto dal fracking ha colpito l'Oklahoma. Secondo lo U.S. Geological Survey, i terremoti indotti dalle attività umane potrebbero arrivare anche a magnitudo molto più distruttive, fino a 7.

I geologi statunitensi hanno analizzato le aree di otto Stati della parte centrale del paese dove si è registrato un aumento straordinario del numero di piccoli terremoti. Si tratta delle zone in cui si estrae petrolio fratturando le rocce del sottosuolo con iniezioni di liquidi per estrarne idrocarburi che sarebbero altrimenti irraggiungibili.

In Oklahoma sono sotto accusa in particolare i pozzi di smaltimento delle acque usate per il fracking e quindi contaminate. Una volta separate da gas e petrolio vengono reiniettate nel terreno in profondità, sotto le falde acquifere. Queste iniezioni di grandi volumi d'acqua avvengono vicino a strati di rocce basali che possono fratturarsi e in alcuni casi sono vicini a faglie. Inoltre nelle aree interessate gli edifici non sono costruiti con criteri antisismici, dato che si tratta di aree in cui in passato il rischio sismico non era elevato.

I cittadini colpiti dai terremoti, che hanno danneggiato decine di edifici, stanno denunciando le imprese petrolifere responsabili dei quasi 5000 pozzi di smaltimento presenti nello Stato. Ma anche altri Stati potrebbero essere coinvolti: sia Texas che Colorado, per esempio, hanno sperimentato terremoti che potrebbero essere riconducibili all'estrazione di idrocarburi. Il fracking non è però l'unico accusato: anche alcune attività minerarie e lo sfruttamento dell'energia geotermica potrebbero essere responsabili di scosse in altre aree del mondo.

Alessandro Delfanti

Colori e ritmi circadiani

Non solo il calare della luce, ma anche il suo colore, indicano al cervello l'arrivo della notte e regolano l'orologio interno che detta i ritmi giornalieri. Lo mostra su «PLoS Biology» Timothy Brown, dell'Università di Manchester.
Brown ha misurato nei topi l'attività del nucleo soprachiasmatico, un centro dell'ipotalamo che è collegato alla retina e detta i ritmi circadiani. Esponendo i topi a luce di varie intensità e colori, Brown ha però visto che almeno un quarto dei neuroni risponde con forza a variazioni del colore, e soprattutto al blu del crepuscolo, con effetti tangibili: se la luminosità varia ai consueti ritmi, ma il colore no, il picco notturno di temperatura dei roditori arriva con mezz'ora di anticipo, segno di un orologio sregolato. I neuroni soprachiasmatici mostrano infatti ritmi di attività alterati. Il sistema è conservato nell'uomo, e i risultati dovrebbero valere anche per noi. «Prima si pensava che l'orologio fosse regolato solo dalla quantità di luce, misurata da fotorecettori con spiccata sensibilità al blu-verde, da cui l'importanza ascritta alla luce blu. Noi invece abbiamo mostrato che il sistema usa anche i coni per discriminare i colori. E riconosce un blu-giallo un po' diverso, che segnala il crepuscolo», osserva Brown. (GiSa)

Effetto placebo? Anche una questione di geni

È possibile che un paziente tragga beneficio da una sostanza priva di principi attivi, se è convinto che il trattamento sia efficace: si chiama effetto placebo, ed è un fenomeno oggetto di numerose ricerche, diventato una parte fondamentale degli studi clinici. La risposta dei pazienti non è però uniforme; alcune persone mostrano infatti una più forte tendenza a sperimentare l'effetto placebo.

Per spiegare questa variabilità, alcuni ricercatori hanno identificato un gruppo di geni che potrebbe influenzare la reazione delle persone al trattamento. Una rassegna della letteratura scientifica, pubblicata su «Trends in Molecular Medicine», pone l'attenzione su un network di geni che potrebbero essere considerati come marcatori dell'effetto placebo. Prendere in considerazione il fattore genetico, suggeriscono gli autori dell'analisi, dovrebbe portare a un ripensamento degli studi clinici sull'efficacia dei farmaci.

Sarebbe infatti possibile selezionare i partecipanti agli studi anche sulla base del loro background genetico, che potrebbe influenzare l'esito delle ricerche. Ma questa possibilità, secondo gli autori, solleva anche questioni di tipo etico: sarebbe corretto indirizzare il paziente verso un particolare tipo di trattamento sulla base del suo specifico profilo genetico? (VaDa)

Chi segue la folla

Le folle si comportano un po' come un gregge di pecore: seguono dinamiche simili e sono influenzate dai soggetti che mostrano di sapere dove andare. È questo il risultato dello studio di Emiliano Cristiani, dell'Istituto per le applicazioni del calcolo del CNR di Roma e colleghi del Politecnico di Monaco di Baviera. La ricerca è di prossima pubblicazione sul «SIAM Journal on Applied Mathematics».

In matematica, un gregge è considerato come un sistema autoorganizzante, e sono stati sviluppati modelli matematici per la previsione e il controllo del comportamento di sistemi di questo tipo. In un esperimento sul campo, le persone sono risultate suscettibili alla guida di cosiddetti «leader nascosti», ossia soggetti informati, mescolati alla folla, che sapevano come raggiungere nel modo più veloce un dato luogo e che finivano per trascinare la gente dietro di sé. La ricerca permetterà di elaborare modelli per la strategia ottimale di deflusso delle persone. (StPi)

L'irregolare camminata del polpo

Otto tentacoli disposti a raggiera attorno a una grande testa priva di movimento rotatorio conferiscono al polpo una geometria corporea unica. Per capire i segreti della sua locomozione, un gruppo di scienziati israeliani ha analizzato 145 filmati di polpi in movimento. Lo studio, pubblicato a maggio su «Current Biology», ha rivelato che l'animale si muove di preferenza a 45 gradi a destra o a sinistra rispetto al suo asse, una direzione che coincide con l'orientamento degli occhi. L'identica forza propulsiva degli otto arti gli permette però di procedere in tutte le direzioni – anche all'indietro – con la stessa facilità. I ricercatori non sono invece riusciti a identificare nessun ritmo nella sequenza dei passi. Anche quando il polpo procedeva in linea retta verso una fonte di cibo – una situazione in cui si può escludere che i movimenti siano casuali – la durata di ogni passo e l'alternarsi dei tentacoli non sembrava seguire nessuna logica, al contrario di quanto avviene nei ragni e altri animali con molte zampe disposte in fila. La direzionalità sarebbe quindi frutto di una serie infinita di decisioni e aggiustamenti «dell'ultimo momento». Un meccansimo simile a quello delle saccadi, i rapidi movimenti con cui i nostri occhi esplorano in continuazione il campo visivo. (EdA)

Andrea Francolini/Corbis (*tramonto*); Oleksiy Maksymenko/All Canada Photos/Corbis (*folla*); Visuals Unlimited/Corbis (*polpo*)

Peer review alla riscossa

La *peer review* non è poi così male. L'efficacia della valutazione fra pari è spesso discussa. «Un timore è che le credenziali dei proponenti contino più della proposta in sé. E, per assurdo, se le istituzioni d'élite producono ricerche più citate, finanziare costoro senza leggere i progetti darebbe una falsa impressione di selezione efficace», spiegano su «Science» Danielle Li e Leila Agha.

Ma almeno per i National Institutes of Health (NIH) statunitensi il timore è infondato, come mostra un'analisi su 130.000 grant erogati fra il 1980 e il 2008. Ciascun progetto valutato dagli NIH riceve un punteggio, e l'analisi mostra che il punteggio pronostica il futuro impatto dei lavori: una deviazione standard in meno nel punteggio significa il 7 per cento meno di pubblicazioni, il 15 per cento in meno di citazioni e il 14 per cento in meno di brevetti, anche a parità di credenziali dei proponenti.

La peer review ha quindi un «valore aggiunto», individuando i progetti migliori. (GiSa)

Risolto il paradosso di Fermi-Pasta-Ulam

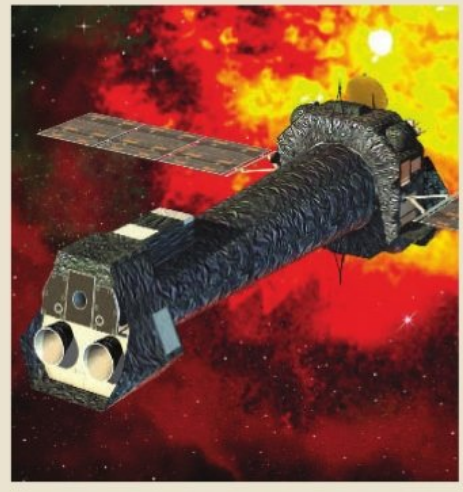
Dopo oltre sessant'anni, fisici italiani potrebbe aver risolto il cosiddetto problema di Fermi-Pasta-Ulam. Il paradosso fu evidenziato per la prima volta da, appunto, Enrico Fermi, John Pasta e Stanislav Ulam nel 1953, quando studiarono i movimenti degli atomi in un solido mediante un piccolo modello di masse (atomi) e molle (forze di reciproca interazione). Il team realizzò una simulazione al computer dei movimenti degli atomi rivelando una contraddizione, rispetto alle previsioni teoriche, sul modo di distribuzione dell'energia termica.

Ora, come si legge su «PNAS», un gruppo guidato da Miguel Onorato, dell'Università degli Studi di Torino, avrebbe risolto il problema. «Il paradosso – spiega Onorato – consisteva nel fatto che il corpo che veniva riscaldato non trovava, nella simulazione, un equilibrio termodinamico, ma dopo un po' tornava nelle condizioni di partenza. In realtà, abbiamo provato che questo equilibrio si raggiungeva solo in tempi molto più lunghi di quelli che il computer dell'epoca potesse vedere». Applicando la teoria della turbolenza delle onde, i ricercatori sono infatti riusciti a capire meglio il meccanismo della distribuzione dell'energia termica e a predire, date determinate condizioni iniziali, il tempo necessario per raggiungere l'equilibrio termico. (StPi)

Assioni emessi dal Sole? Un abbaglio!

Niente materia oscura dal Sole. Ad affermarlo sono Marco Roncadelli, della sezione INFN di Pavia, e Fabrizio Tavecchio, dell'Osservatorio astronomico di Brera dell'INAF, che hanno pubblicato una ricerca su «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society». La stessa rivista aveva pubblicato nell'ottobre 2014 lo studio di un gruppo britannico guidato da George Fraser, dell'Università di Leicester, secondo cui, dall'analisi dei dati dell'osservatorio orbitante XMM-Newton dell'ESA, si poteva dedurre che il flusso stagionale anomalo di raggi X osservato avesse origine dalla trasformazione e diffusione degli assioni emessi dal Sole in fotoni X in presenza del campo magnetico terrestre. Secondo quella ricerca gli assioni, possibili candidati della materia oscura, sarebbero emessi dalle regioni centrali del Sole e, poiché debolmente interagenti con la materia, sarebbero capaci di uscirne imperturbati.

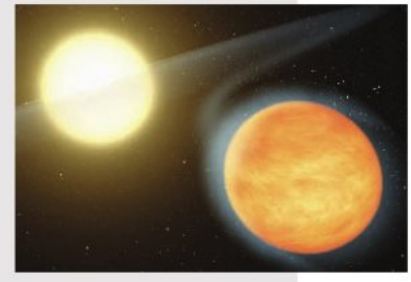
Partendo da questa ipotesi, Roncadelli e Tavecchio hanno ricalcolato il flusso X che il satellite misurerebbe se puntasse direttamente il Sole – fatto ipotetico, in quanto i suoi rivelatori verrebbero distrutti – trovando esattamente gli stessi valori di Fraser e colleghi. Il risultato smentisce dunque la possibilità che il flusso anomalo di raggi X provenga da assioni emessi dal Sole e diffusi dal campo geomagnetico. Resta però ancora da capirne la periodicità stagionale. (EmRi)



George Steinmetz/Corbis (*ricercatore*); NASA/JPL-Caltech/Corbis (*esopianeta*); ESA (*XMM-Newton*)

La formazione dei giganti gassosi

Gran parte degli esopianeti giganti gassosi percorre orbite strette attorno alla stella centrale, ma in alcuni casi possono trovarsi anche in orbite a distanze superiori a quella Terra-Sole. Finora però i modelli di formazione di questo tipo di pianeti non spiegavano la frazione di giganti gassosi osservati in orbite lontane dalle rispettive stelle, ma un nuovo modello al computer, sviluppato da un gruppo guidato da Pablo Benítez-Llambay, dell'Universidad Nacional de Córdoba, in Argentina, è in grado di giustificare la



mancata migrazione verso l'interno di alcuni embrioni di giganti gassosi. Come si legge su «Nature», a impedire lo spostamento verso un'orbita più stretta sono le asimmetrie termiche presenti nel materiale in caduta verso l'embrione planetario. In particolare, sono le differenze di temperatura fra il gas che precede il pianeta in formazione lungo la sua orbita e quello che lo segue a creare una forza che controbilancia le forze mareali del disco protoplanetario e quindi la sua tendenza alla migrazione. Secondo le simulazioni, il meccanismo di riscaldamento del gas circostante dipende da molti fattori, fra cui la velocità di accrescimento dell'embrione: più è rapido, minore è il rischio che il pianeta migri verso l'interno. (EmRi)

IL FUTURO DELLA MEDICINA 2015

Piccole meraviglie

Grazie alla nanomedicina, gli scienziati stanno sviluppando nuovi metodi per combattere i tumori, guarire le ferite e pilotare i farmaci nelle cellule

di Josh Fischman

Una molecola di DNA, con il suo progetto di vita, ha un diametro di circa 2,5 miliardesimi di metro. Oggi gli scienziati sono in grado di costruire molecole della stessa dimensione e di creare dispositivi capaci di rilevarle con un livello di precisione senza precedenti. Queste potenzialità, rese possibili grazie a un incessante lavoro di ricerca nell'ultimo decennio, stanno portando alla nascita di nuovi tipi di medicina e a nuovi metodi con cui diagnosticare le malattie. In questo dossier, esaminiamo lo stato attuale della nanomedicina, le prospettive a breve termine e gli sviluppi più plausibili per il futuro.

Attualmente la chemioterapia è uno dei punti principali di queste ricerche, e farmaci in grado di penetrare nei tumori grazie alla struttura nanoscopica hanno successo in casi in cui altre terapie falliscono (si veda *Farmaci per il cancro: colpire nel segno*, a p. 38). Anche i test diagnostici sfruttano queste tecniche e usano sonde di DNA di forma inconsueta capaci di individuare i tumori con grande precisione. E ancora, nel prossimo futuro i pazienti dovrebbero poter usare bende intelligenti composte da nanoparticelle per migliorare la guarigione delle ferite più gravi e informare i medici nel caso in cui la guarigione non si verifichi (si veda *Fasciature intelligenti*, a p. 41). Guardando oltre, i ricercatori sperano di collegare minuscoli motori molecolari ai farmaci per guidarli sul bersaglio attraverso il flusso sanguigno (si veda *Lanciate i nanorobot!*, a p. 44). Ecco a voi le conquiste della nanoingegneria: benché invisibili all'occhio umano, l'effetto di queste tecnologie sulla salute potrebbe essere smisurato.

John Fischman è senior editor *di «Scientific American»*

Illustrazioni di Harry Campbell

Dina Fine Maron è *associate editor* di «Scientific American».

NANOMEDICINA OGGI

Farmaci per il cancro: colpire nel segno

Piccole strutture trasportano in modo efficace molecole anticancro verso le masse tumorali e riducono gli effetti collaterali

di Dina Fine Maron

IN BREVE

I farmaci chemioterapici faticano a colpire i bersagli designati: l'organismo li rifiuta, non penetrano efficacemente nei tumori e spesso scambiano cellule sane per cellule tumorali.

Gli scienziati hanno sviluppato farmaci in grado di evitare questi problemi grazie un involucro nanoscopico che li avvolge. Regolando con estrema precisione le sostanze che compongono l'involucro, i ricercatori sono in grado di produrre medicinali che sfuggono agli allarmi del sistema immunitario, puntando direttamente ai tessuti maligni.

Mentre questi farmaci sono già alle fasi finali dei trial, è in corso lo sviluppo di nanoparticelle che abbiano non solo il ruolo di vettori, ma che siano anche in grado di inibire autonomamente gli oncogeni.

Ai tumori piace giocare a nascondino nel corpo, e spesso gli sconfitti sono i farmaci usati per combatterli, se non i pazienti stessi. I farmaci hanno difficoltà a distinguere le cellule tumorali da quelle sane, e potrebbero agire su cellule normali provocando effetti collaterali senza toccare i tessuti tumorali vicini. Inoltre i tumori maligni possono ricevere un aiuto ulteriore dall'apparato di difesa dell'organismo, il sistema immunitario, che spesso confonde i farmaci antitumorali con batteri pericolosi o altri invasori e li distrugge. Quello che ne rimane è trasportato verso i ricettacoli di scorie dell'organismo nel fegato, nei reni e nella milza prima ancora di raggiungere il bersaglio. Anche quando i farmaci raggiungono il tumore, spesso rimangono incastrati nel denso sottobosco della massa maligna senza penetrarla del tutto.

Grazie agli sviluppi della nanomedicina, i farmaci affrontano questo scenario insidioso con più facilità e colpiscono i tumori nella loro sede. Il segreto consiste nel veicolo per il trasporto del farmaco, appositamente creato e avvolto in un involucro protettivo, che trasporta gli antitumorali in tutto il corpo. La capacità di controllare con la massima precisione la composizione di questi veicoli, del diametro di qualche miliardesimo di metro, ha permesso agli

Grazie alla sua struttura e alla copertura protettiva, il farmaco in versione nanoscopica ha più probabilità di raggiungere i tumori senza essere distrutto dall'organismo

scienziati di creare una struttura specializzata che, tra le altre cose, elude gli allarmi del sistema immunitario. Alcuni scienziati – tra i quali Kazunori Kataoka – dell'Università di Tokyo, hanno inserito potenti farmaci antitumorali in guaine della dimensione di un virus dell'epatite C, 200 volte più piccole di un globulo rosso. A livello molecolare, questi farmaci sono molto più simili alle sostanze prodotte dall'organismo e offrono il vantaggio aggiuntivo di riuscire a penetrare nei tumori evitando le cellule sane.

In Asia, diverse varianti dei nanovettori di Kataoka sono alla fase finale dei trial; ognuna contiene farmaci diversi ed è destinata a tipi diversi di tumore. I farmaci in questi vettori hanno rallentato o invertito la progressione della malattia in pazienti con tumore al seno o al pancreas. Negli Stati Uniti un'altra nanoparticella ha raggiunto la seconda fase degli studi clinici. «In questo ambito le fasi iniziali degli studi richiedono tempo, ma credo che il settore inizi a mantenere le promesse. Nei prossimi cinque anni potremo assistere a progressi molto più rapidi», afferma Kataoka.

Farmaci in incognito

L'impiego delle nanotecnologie nei farmaci chemioterapici non è una novità. Alcuni esempi di nanofarmaci già sul mercato sono paclitaxel, per il tumore metastatico al seno, e leuprorelina acetato, per il cancro prostatico avanzato. Ma questi farmaci attaccano solo alcuni tumori, rendendo indispensabili nuove alternative. I progressi dell'ingegneria hanno consentito agli scienziati di adattare la struttura dei nanovettori in modo da renderli più efficaci e precisi in un numero crescente di tumori. Le nanoterapie in fase di test, somministrate per endovena, sembrano avere maggiore successo nel combattere il cancro.

Molti di questi nanofarmaci di ultima generazione sono composti da un nucleo contenente il farmaco avvolto in una guaina morbida cosparsa di glicole polietilenico, un materiale sintetico che svolge la funzione di agente mascherante. La copertura è composta di molecole d'acqua, che sono attirate dal materiale della guaina e quindi la circondano con un liquido comunemente presente nell'organismo. L'acqua aiuta a inibire le cariche elettriche emesse dalla particella, che altrimenti allerterebbero il sistema immunitario della presenza di una sostanza sconosciuta.

La protezione liquida ricopre anche i margini della nanoparticella, rendendo la sua superficie troppo liscia per far presa su eventuali sentinelle del sistema immunitario come gli anticorpi. Inoltre la dimensione della nanoparticella, di poco superiore a un farmaco chemioterapico convenzionale, fa sì che gli enzimi dell'organismo non riescano a scinderla troppo velocemente.

MONITORARE LA MALATTIA

Un lampo per le diagnosi di cancro

Sfere di DNA che emettono bagliori quando rilevano un tumore sono uno degli strumenti più intelligenti della nanomedicina

Il cancro viaggia. I tumori estesi liberano cellule che si spostano nell'organismo dando vita a nuove formazioni maligne. Oggi gli scienziati sfruttano le nanoscienze per ottenere curiose sfere composte di DNA – molecola diventata famosa per un'altra sua forma, quella a doppia elica – in grado di localizzare, colpire e potenzialmente distruggere queste cellule tumorali.

Le sfere somigliano vagamente a un insieme di stuzzicadenti incastrati in una pallina di gommapiuma. Gli stuzzicadenti sono in realtà una densa moltitudine di singoli filamenti di DNA che partono da un nucleo centrale. I filamenti sono selezionati per la loro capacità di legarsi a DNA complementare nelle cellule tumorali. La formazione di questo legame porta piccole molecole che emettono luce alle estremità del DNA della sfera: fondamentalmente emettono un bagliore che indica la presenza di un tumore. Più intenso è bagliore, maggiore è la quantità di DNA tumorale presente, afferma Chad A. Mirkin, chimico e direttore dell'International Institute for Nanotechnology alla Northwestern University, a capo del progetto di ricerca.

Tutto questo avviene in un campione di sangue del paziente. Quando le sfere incontrano una cellula, attraversano i pori della membrana cellulare fino a penetrarla. Poiché le sfere hanno una superficie maggiore rispetto ad altre forme, il DNA che compone il margine esterno ha una probabilità molto più elevata di incontrare il DNA tumorale e legarvisi rispetto ai singoli filamenti. Secondo Mirkin, gli acidi nucleici sferici «si legano ad altri acidi nucleici con una forza 100 volte superiore».

Le sfere di Mirkin, le cosiddette *nanoflare* (letteralmente, «nanobagliori»), sono già usate dagli ospedali per diagnosi rapide di tumore. Altri sistemi identificano cellule tumorali morte sulla base delle proteine che si trovano sulla loro superficie esterna; tuttavia, dice Mirkin, dato che le sfere sono in grado di localizzare cellule vive, gli scienziati potrebbero testare la risposta di queste cellule a farmaci diversi e studiare terapie personalizzate in base ai risultati.

Joshua A. Krisch

Joshua A. Krisch è giornalista scientifico

Questa maggiore resistenza garantisce al farmaco un tempo superiore per raggiungere il tumore e svolgere la sua funzione. Per esempio, il primo nanofarmaco antitumorale approvato (doxorubicina liposomiale pegilato), trascorre metà del suo tempo di vita nel flusso sanguigno, un periodo 65 volte più lungo rispetto al corrispondente chemioterapico convenzionale, doxorubicina (entrambi i farmaci si usano contro il tumore ovarico). Grazie alla sua struttura e alla copertura protettiva, il farmaco in versione nanoscopica ha più probabilità di raggiungere i tumori senza essere distrutto dall'organismo. Inoltre, la consistenza morbida e flessibile dei nuovi farmaci con involucro nanoscopico permette di aggirare uno degli ostacoli finali: il denso e irregolare ecosistema del tessuto maligno che potrebbe intercettare particelle più rigide.

L'arma finale delle nuove nanoparticelle è al loro interno. Poiché il nucleo contenente il farmaco può essere degradato da sostanze acide, si disintegrerà velocemente e spargerà il proprio contenuto solo dopo aver lasciato l'ambiente neutro del sangue e aver raggiunto il tumore, che ha livelli di acido più elevati.

Per dirigere i nanovettori verso il tumore e lontano dalle cellule sane con maggiore accuratezza, altri scienziati tentano di cospargerli esternamente con molecole di specifici anticorpi attirati dalle proteine che abbondano sulle cellule tumorali, come la proteina EGFR. Dean Ho, bioingegnere dell'Università della California a Los Angeles, ha effettuato test preliminari pubblicati su «Advanced Materials» nel 2013, dimostrando che le nanoparticelle possono essere rivestite di anticorpi che si legano a queste proteine.

È inoltre possibile produrre nanoparticelle che svolgano non solo la funzione di vettori ma di farmaci veri e propri. Alla Northwestern University gli scienziati hanno ottenuto nanoparticelle d'oro legate a materiale genetico (RNA), scelto per la sua capacità di inibire gli oncogeni. Data la dimensione ridotta delle particelle e altri fattori non ancora identificati, le particelle d'oro cosparse di RNA riescono a penetrare in uno dei luoghi più difficili da raggiungere per un farmaco: il cervello. A ottobre 2013 i ricercatori hanno riferito che negli animali le nanoparticelle possono attraversare la barriera ematoencefalica, uno stretto reticolato di capillari sottili, aiutando a combattere i tumori cerebrali. Nonostante la tecnica abbia ridotto la dimensione complessiva di tumori in roditori, alla fine gli animali sono morti comunque, afferma Alexander Stegh, ricercatore alla Northwestern University. È ancora in fase di studio il modo esatto in cui questa tecnica sia riuscita ad aggirare la barriera sanguigna del cervello, dice Stegh. È possibile che la struttura delle particelle si leghi a recettori localizzati sulla superficie delle cellule dei vasi sanguigni, e che i recettori spingano le particelle verso l'interno.

Sono in corso ulteriori studi su altri tipi di nanoparticelle composte da acidi nucleici e usate come sonde per identificare le cellule tumorali che circolano nel sangue (*si veda il box in questa pagina*). Chad Mirkin, chimico alla Northwestern University e a capo del progetto, sostiene che lo studio potrebbe portare alla produzione di nanoparticelle che trasportino sia sostanze diagnostiche sia farmaci: una combinazione formidabile, che potrebbe eliminare le cellule tumorali difficili da localizzare prima che si diffondano in altre parti del corpo. L'invenzione di simili sostanze, tanto minuscole quanto potenti, non sarebbe certo un'impresa di piccole dimensioni. ■

PER APPROFONDIRE

Nanoparticle PEGylation for Imaging and Therapy. Jokerst J.V. e altri, in «Nanomedicine», Vol. 6, n. 4, pp. 715–728, giugno 2011.

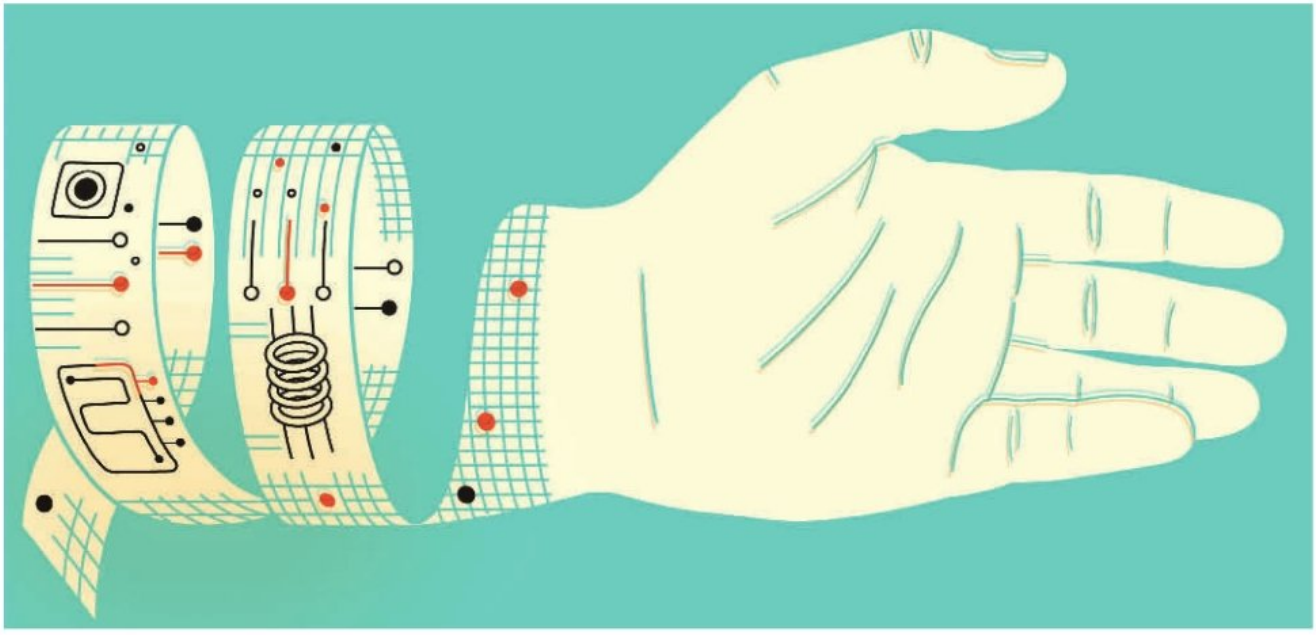
Nanomedicine: Towards Development of Patient-Friendly Drug-Delivery Systems for Oncological Applications. Ranganathan R. e altri, in «International Journal of Nanomedicine», Vol. 7, pp. 1043–1060. Pubblicato on line il 23 febbraio 2012. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3292417.**

Progress of Drug-Loaded Polymeric Micelles into Clinical Studies. Cabral H. e Kataoka K., in «Journal of Controlled Release», Vol. 190, pp. 465–476. Pubblicato on line il 28 settembre 2014. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3217316.**

di Mark Peplow

Fasciature intelligenti

Nuovi materiali non si limiteranno a fasciare le ferite, ma allerteranno i medici in caso di problemi e somministreranno farmaci



I soldati feriti erano stati curati a dovere fin dal loro ritorno dalla guerra in Afghanistan. Al San Antonio Military Medical Center, in Texas, i chirurghi avevano innestato tessuto sano sopra ustioni e ferite, usando tecniche di microchirurgia per collegare i vasi sanguigni alla nuova pelle. Ma i pazienti mostravano ancora un recupero incerto. Probabilmente i vasi non fornivano ossigeno sufficiente per far crescere bene l'innesto.

Quando Conor Evans visitò l'ospedale, nel 2010, e vide questi soldati, capì che le tecniche convenzionali con cui si monitoravano i livelli di ossigeno non avevano funzionato molto bene, e spesso non allertavano in tempo se il trapianto stava fallendo. «Quei medici fanno qualcosa di eccezionale», dice Evans, che è chimico alla Harvard Medical School e al Wellman Center for Photomedicine del Massachusetts General Hospital. «Ma i sensori che avevano non erano adeguati».

Così Evans ha prodotto una fasciatura migliore. Con i suoi colleghi, ha iniziato a usare coloranti che reagiscono a livelli diversi di ossigeno, ha aggiunto nanoparticelle che controllano l'attività del colorante e ha impiegato il tutto per creare una fasciatura liquida in grado di indicare le condizioni di salute della ferita che copre. «La fasciatura cambia colore proprio come

Mark Peplow è un giornalista scientifico di Cambridge, nel Regno Unito.

un semaforo, passando per verde, giallo, arancione e rosso», in funzione della quantità di ossigeno, dice Evans. Dopo il successo ottenuto con gli animali in laboratorio nel 2014, quest'anno dovrebbero iniziare trial sugli esseri umani.

Sfruttando le nuove capacità di manipolare materiali con dimensioni di pochi miliardesimi di metro, scienziati come Evans possono migliorare il processo di valutazione rapida delle condizioni di salute e trasformare garze, bende e cerotti in sistemi di precisione per la somministrazione di farmaci. «Le nanotecnologie hanno un ruolo di rilievo nel controllo delle quantità di farmaco rilasciate e nell'efficacia con cui i farmaci arrivano sulla ferita», dice Paula Hammond, chimica al Massachusetts Institute of Technology. Questa precisione è più vantaggiosa rispetto all'inondare l'organismo di grosse quantità di farmaco, di cui solo una minima parte raggiunge il bersaglio.

Una boccata d'aria

La guarigione scadente delle ferite causata da scarsità di ossigeno interessa ogni anno più di 6 milioni di persone negli Stati Uniti, con costi stimati in 25 miliardi di dollari. Di solito i medici infilano elettrodi ad ago nel tessuto danneggiato per misurarne la quantità di ossigenazione, ma gli aghi possono causare dolore e fornire letture circoscritte a un solo punto di una ferita più ampia. La fasciatura di Evans fornisce invece una mappa istantanea dell'ossigeno nell'intera area della lesione.

La mappa si basa su due coloranti mescolati all'interno di una fasciatura liquida ad asciugatura rapida, che può essere applicata sulle ferite. Un breve flash di luce blu fornisce energia e illumina entrambi i coloranti: uno brilla di un bel colore rosso brillante, l'altro è verde. Subito dopo però le molecole di ossigeno spengono la fosforescenza del colorante rosso in modo che il bendaggio appare verde se il tessuto è saturo di ossigeno ed è in buona salute. Ma se le regioni della ferita sono in debito di ossigeno attraverso la fasciatura iniziano a comparire chiazze gialle, arancioni e alla fine anche allarmanti macchie rosse.

La chiave dell'allarme è un'aggiunta nanoscopica alle molecole di colorante rosso. Evans ha accoppiato ciascuna di queste molecole a un dendrimero, una molecola la cui forma ricorda un albero, dotata di una struttura ramificata trasversale che può misurare fino a 2 nanometri. Questo boschetto molecolare impedisce che molecole vicine si sovrappongano smorzando a vicenda la fosforescenza. I dendrimeri inoltre bloccano fisicamente alcune molecole di ossigeno, ma non tutte, impedendo loro di raggiungere il colorante; iniziare da livelli più bassi rende ogni cambiamento più evidente.

In un ospedale, la comparsa del colorante rosso (il segnale di allarme) dovrebbe indurre un'infermiera a fotografare la fasciatura, e i medici a cercare di migliorare la circolazione di sangue e ossigeno nei punti problematici. In linea di principio, la fasciatura potrebbe funzionare anche a casa, dice Evans: i pazienti potrebbero scattare istantanee della ferita e inviarle al medico per un controllo.

Evans ha anche creato coloranti alternativi più efficienti nel convertire la luce blu in quella rossa. «La nuova fasciatura è così brillante che si può vedere anche in piena luce, a bassissime concentrazioni di colorante», spiega. In futuro, la fasciatura potrebbe essere ingegnerizzata in modo da somministrare farmaci terapeutici direttamente nelle ferite, aggiunge Evans.

Vestito per farmaci

Nel laboratorio di Hammond, i ricercatori hanno già caricato le fasciature con sostanze terapeutiche nanoingegnerizzate. Hanno messo a punto rivestimenti che rilasciano lentamente RNA o proteine, molecole che possono silenziare alcune attività cellulari che potrebbero ostacolare la guarigione delle ferite. Per esempio alcune molecole di RNA, chiamate *small interfering* RNA (siRNA), possono intralciare l'attività di geni che codificano per proteine che causano problemi.

La fasciatura è verde se il tessuto lesionato è saturo di ossigeno ed è in salute. Ma se alcune regioni della ferita sono poco ossigenate, compaiono chiazze gialle, arancioni e, alla fine, anche di un rosso allarmante

Il gruppo di Hammond ha incapsulato alcuni di questi RNA in gusci di fosfato di calcio, ciascuno del diametro di circa 200 nanometri, poi ha inserito i gusci fra due strati di un polimero carico positivamente fatto di molecole biologiche, e quindi ha spalmato su un lato di questa specie di sandwich un'argilla carica negativamente. (Le cariche opposte uniscono fra loro i due lati). Impilando uno sull'altro fino a 25 di questi sandwich si ottiene un rivestimento spesso circa mezzo micrometro, che Hammond e colleghi hanno messo su un comune bendaggio di nylon.

Siccome gli enzimi naturalmente presenti nell'organismo scindono gli strati, questo «abbigliamento» scarica gli RNA nella ferita nel corso di una settimana. Il rilascio lento e costante potrebbe ridurre gli effetti collaterali causati da un'unica, mas-

IN BREVE

Bende, garze e cerotti si possono trasformare in sistemi di precisione per somministrare farmaci manipolando materiali con dimensioni di miliardesimi di metro.
Le nanotecnologie permettono di inserire farmaci fra gli strati di una fasciatura e di controllare la quantità di farmaco liberata.
Fasciature sensibili possono rilevare le condizioni di ferite gravi e liberare molecole in grado di ostacolare proteine che creano problemi.
Piccoli dispositivi a strati possono essere inseriti nelle arterie coronarie. Gli strati, dissolvendosi, rilasciano DNA che codifica per una proteina che aiuta a ricostruire i vasi sanguigni danneggiati.

Lavorare dall'interno

Circuiti elettronici che non lacerano i tessuti possono avvolgere e monitorare organi vitali

L'hardware dell'elettronica si è dimostrato un misero supporto per il software costituito dalla carne umana. I circuiti rigidi non si adattano a organi flessibili, e spigoli acuminati lacerano i tessuti molli. Questo problema ha posto un serio limite agli sforzi per migliorare dispositivi come i cateteri che puliscono le arterie aggiungendo controlli e finezze computerizzati. Il silicio potrebbe sostenere l'intera industria dei computer, ma è friabile.

Eppure, addirittura i materiali più refrattari diventano flessibili se li si rende sufficientemente sottili, dice John Rogers, ricercatore all'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign. Rogers costruisce fogli elettronici stirabili spessi appena 10 nanometri, per dispositivi che potrebbero essere collocati dentro o attorno a organi come il cuore e svolgere la loro funzione senza causare danno. Rogers li chiama «elettronica dolce».

I circuiti che Rogers costruisce devono usare conduttori ad alta fedeltà, come silicio e nitruro di gallio, perché devono ritrasmettere segnali di computer senza intoppi. Per ovviare alla tendenza del silicio a rompersi quando è piegato, Rogers ha usato tecniche di nanoingegneria per rendere più sottile il materiale pur mantenendone integre le capacità di conduttore. Ridotto alle dimensioni di circa 10 nanometri, il silicio si comporta più come un elastico e meno come un materiale vetroso.

Negli animali, Rogers ha già testato con successo una membrana flessibile con circuiti elettronici incorporati, che può essere avvolta attorno a un cuore per monitorare eventuali aritmie. Se i test continueranno ad avere successo, Rogers immagina che sarà possibile aggiungere schermi elettronici a dispositivi che tengono aperte le arterie, come i cateteri a palloncino, in modo da rilevare restringimenti delle arterie coronarie. «Dispositivi meccanici semplici potrebbero diventare strumenti chirurgici sofisticati», dice Rogers.

J.A.K.

siccia dose di farmaco tradizionale, garantendo un trattamento costante alla ferita.

Hammond ha anche usato questo rivestimento strato-su-strato per somministrare una proteina terapeutica che aiuta la guarigione delle ferite in topi diabetici. La proteina è già disponibile sotto forma di pomata, anche se Hammond avverte che la formulazione attuale non è molto efficace: dopo l'iniziale somministrazione di una dose massiccia di proteina, la sua attività svanisce nel giro di 24 ore. Il bendaggio di Hammond, al contrario, garantisce un flusso continuo per 5-7 giorni per mantenere il dosaggio ottimale di proteina.

La strategia strato-su-strato potrebbe migliorare le cure per un'altra patologia: la malattia coronarica, che è causata da un accumulo di placche nei vasi sanguigni che trasportano il sangue attraverso il muscolo cardiaco. Di solito la terapia consiste nel dilatare le arterie con un palloncino gonfiabile e nel mantenerle dilatate inserendovi un piccolo tubo a maglie di acciaio inossidabile, chiamato *stent*. Alcuni stent sono «medicati», cioè liberano molecole terapeutiche che impediscono all'arteria di chiudersi nuovamente, ma in questi casi i pazienti devono prendere più farmaci per ridurre il rischio associato di trombi che potrebbero formarsi nella regione interessata.

Curare le arterie con dosi di DNA somministrate in modo controllato grazie a dispositivi di dimensioni nanometriche potrebbe offrire una soluzione migliore, secondo David Lynn, chimico all'Università del Wisconsin a Madison. Una volta dentro l'organismo, il DNA potrebbe permettere alle cellule di produrre una proteina che aiuta a stabilizzare e a ricostruire le pareti dei vasi sanguigni. Per usare queste terapie genetiche quando e dove sono necessarie, Lynn ha rivestito gli stent con strati sovrapposti di DNA e di un polimero biodegradabile, ciascuno dei quali spesso diversi nanometri. Variando il numero degli strati, i ricercatori possono controllare la quantità di DNA liberata nel vaso sanguigno. Esperimenti sui maiali hanno dimostrato che il DNA penetrava in modo graduale nel tessuto circostante per circa tre giorni dall'impianto dello stent, e un'attenta modulazione della progettazione del rivestimento ha permesso a Lynn e colleghi di cambiare il tasso di rilascio. «Adesso abbiamo un sistema di controllo ragionevole che ci permette di modulare nel tempo il rilascio, da un periodo di pochi secondi a mesi, modificando la struttura del polimero o il modo in cui mettiamo insieme il film», dice Lynn.

La nanotecnologia di base che è dietro a queste invenzioni potrebbe essere adattata a un'ampia gamma di altre applicazioni. Lynn usa rivestimenti polimerici per somministrare molecole biologiche chiamate peptidi che interrompono le «conversazioni» di carattere chimico stabilite tra batteri. Isolati gli uni dagli altri, i batteri non possono più unirsi a formare biofilm tenaci che resistono addirittura all'azione distruttiva degli antibiotici. Evans, dal canto suo, impiega i coloranti fosforescenti che ha sviluppato in campioni di tessuto per identificare cellule tumorali in condizioni di scarsità di ossigeno, che possono essere particolarmente resistenti alla chemioterapia, e prevede di testare questa tecnica su modelli animali alla fine di quest'anno. Lo stesso approccio a base di colorante potrebbe essere usato anche per rilevare la presenza di batteri infettivi nelle ferite o per identificare altri generi di molecole. «Davvero, l'unico limite è il cielo», dice Evans. ■

PER APPROFONDIRE

Polyelectrolyte Multilayers Promote Stent-Mediated Delivery of DNA to Vascular Tissue. Saurer E.M. e altri, in «Biomacromolecules», Vol. 14, n. 5, pp. 1696-1704, 13 maggio 2013.

Nanolayered siRNA Dressing for Sustained Localized Knockdown. Castleberry S., in« ACS Nano», Vol. 7, n. 6, pp. 5251-5261, 25 giugno 2013.

Surface Coatings That Promote Rapid Release of Peptide-Based AgrC Inhibitors for Attenuation of Quorum Sensing in *Staphylococcus aureus*. Broderick A.H. e altri, in «Advanced Healthcare Materials», Vol. 3, n. 1, pp. 97-105, gennaio 2014.

Click-Assembled, Oxygen-Sensing Nanoconjugates for Depth-Resolved, Near-Infrared Imaging in a 3 D Cancer Model. Nichols A.J., in «Angewandte Chemie International Edition», Vol. 53, n. 14, pp. 3671-3674, 1° aprile 2014.

Non-Invasive Transdermal Two-Dimensional Mapping of Cutaneous Oxygenation with a Rapid-Drying Liquid Bandage. Li Z., in «Biomedical Optics Express», Vol. 5, n. 11, pp. 3748-3764, 1° novembre 2014.

Larry Greenemeier è *associate editor* di «Scientific American».

NANOMEDICINA DEI PROSSIMI DECENNI

Lanciate i nanorobot!

Superare tutte le sfide tecniche può richiedere vent'anni o più, ma i primi passi verso una medicina telecomandata sono già stati fatti

di Larry Greenemeier

Il futuro a lungo termine previsto dai ricercatori che si occupano di nanomedicina include agenti terapeutici incredibilmente piccoli che navigano in modo intelligente, alimentati da energia propria, in direzione di un bersaglio specifico – e solo quel bersaglio – ovunque si trovi nel corpo. Una volta arrivate a destinazione, queste macchine autoguidate potrebbero agire in modi diversi: possono liberare una dose di farmaco oppure aggiornare in tempo reale sullo stato dei progressi della loro attività terapeutica. Poi, una volta compiuta la missione, questi dispositivi si biodegradano in sicurezza, lasciando poche tracce, o addirittura nessuna. Questi cosiddetti nanorobot saranno prodotti con materiali biocompatibili, metalli magnetici o addirittura filamenti di DNA: sono tutti materiali scelti per le utili proprietà che hanno su scala atomica, come anche per la loro capacità di passare indisturbati oltre le difese dell'organismo e di non causare alcun danno cellulare.

Probabilmente questo scenario si realizzerà fra un decennio o due, tuttavia i medici che effettuano ricerche nel settore hanno già iniziato ad affrontare problemi tecnici. Una delle principali sfide consiste nel garantire che i nanodispositivi raggiungano il loro bersaglio nel corpo.

La forza delle onde

La maggior parte dei farmaci oggi sul mercato viaggia attraverso il corpo nel flusso sanguigno, o dopo essere stati iniettati direttamente nel sangue o, nel caso di pillole, dopo essere stati assorbiti nel flusso sanguigno dal tratto gastrointestinale. Tuttavia, in questo modo i farmaci si diffondono sia in zone in cui sono necessari sia in parti del corpo dove, invece, possono causare complicazioni non desiderate. Al contrario, nanomedicine sofisticate sono progettate per essere guidate su un tumore o su altri siti problematici, dove rilasciano il loro principio attivo riducendo la possibilità di effetti collaterali.

Nel breve periodo, campi magnetici e onde a ultrasuoni sono i principali candidati per guidare le nanomedicine, dice Joseph Wang, preside di nanoingegneria e *distinguished professor* all'Università della California a San Diego. Nell'approccio che usa i campi magnetici, i ricercatori incapsulano nanoparticelle di ossido di ferro o nickel, per esempio, all'interno di un particolare farmaco. Poi usano una serie di magneti permanenti che si trovano all'esterno di un animale da laboratorio (di solito un topo) o di un altro soggetto, e spostano la medicina metallica attraendola e respingendola attraverso il corpo fino a farle raggiungere un sito prescelto, manipolando diversi campi magnetici. Nell'approccio con gli ultrasuoni, i ricercatori hanno diretto onde sonore su

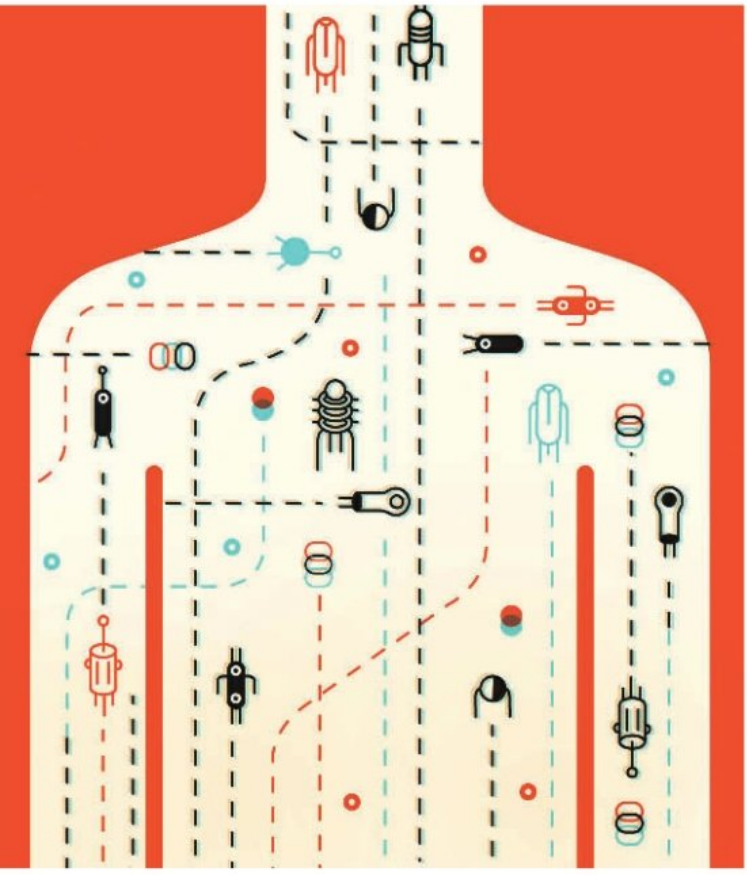
IN BREVE

Prima o poi nanofarmaci e minuscoli dispositivi viaggeranno in qualsiasi area del corpo siano necessari, alimentati in modo autonomo, usando motori e carburanti biocompatibili.

Prima che quel giorno diventi realtà, però, i ricercatori devono capire come progettare questi composti in modo che si spostino senza danneggiare le normali funzioni biologiche e senza interferire con esse.

Nel frattempo gli scienziati usano campi magnetici e ultrasuoni per azionare le nanoparticelle e dirigerle sul bersaglio. Ma questi approcci non permettono di penetrare in profondità nel corpo.

I nanorobot di DNA sono un'ulteriore alternativa. Alcuni sono progettati per funzionare come scatole che si aprono e liberano il loro carico solo in particolari circostanze.



bolle di dimensioni nanometriche contenenti farmaci, provocandone lo scoppio con una forza sufficiente da permettere l'ingresso del contenuto delle bolle in profondità all'interno di un particolare tessuto o tumore.

L'anno scorso, durante una ricerca che puntava alla guarigione delle fratture, medici dell'Università di Keele e dell'Università di Nottingham, nel Regno Unito, hanno aggiunto un utile colpo di scena al loro approccio magnetico. Gli scienziati hanno attaccato nanoparticelle di ossido di ferro a singole cellule staminali e poi hanno iniettato questa preparazione in due diversi ambienti sperimentali: femori fetali di pollo e un'impalcatura ossea ottenuta da gel di collagene idrato ricavato con tecniche di ingegneria dei tessuti. Una volta che le staminali erano arrivate al punto di rottura i ricercatori hanno usato un campo magnetico esterno oscillante per spostare rapidamente lo stress sulle nanoparticelle, che a loro volta hanno trasferito la forza alle cellule staminali. Questo tipo di stress biomeccanico ha aiutato le staminali a differenziarsi in osso più efficacemente. La crescita del nuovo tessuto osseo è avvenuta in entrambi i casi, femori embrionali e impalcatura ossea, sebbene la guarigione generale non sia stata omogenea. Alla fine gli scienziati sperano di rendere più agevole il processo di riparazione aggiungendo vari fattori di crescita alle cellule staminali tempestate di particelle di ossido di ferro, dice James Henstock, ricercatore al Keele Institute for Science and Technology in Medicine.

Nanomedicine indipendenti

Gli inconvenienti principali dell'approccio magnetico e di quello acustico sono dati dalla necessità di usare un sistema di guida esterna, che è ingombrante, e dal fatto che campi magnetici e ultrasuoni possono penetrare solo fino a un certo punto nel corpo. Sviluppare «micromotori» autonomi per la consegna di un cargo terapeutico potrebbe far superare questi problemi.

Questi micromotori dipenderebbero da reazioni chimiche, ma la tossicità è un problema. Per esempio l'ossidazione del glucosio, molecola presente nel sangue, produrrebbe perossido di idrogeno da usare come carburante. Ma i ricercatori sanno già che questo approccio non funziona sul lungo periodo: il perossido di idrogeno corrode i tessuti, e il glucosio non può produrne in quantità sufficiente da alimentare adeguatamente i micromotori. Più promettenti sono i tentativi di usare altre sostanze naturali, come gli acidi gastrici (per applicazioni nello stomaco) o l'acqua (che abbonda in sangue e tessuti), come fonti di energia.

La capacità di questi dispositivi autoalimentati di spostarsi con precisione può essere un ostacolo ancora maggiore. Solo perché le nanoparticelle possono spostarsi ovunque, non significa che si dirigeranno dove i ricercatori vogliono che vadano. La capacità di spostarsi in modo autonomo non è una scelta, ma garantire che le nanomedicine si attivino solo quando si trovano nell'ambiente giusto potrebbe essere uno stratagemma per aggirare il problema.

Per ottenere questo trucco i ricercatori hanno creato nanomacchine a partire da forme sintetiche di DNA. Disponendo le subunità della molecola in modo che le cariche elettrostatiche le costringano ad assumere una particolare configurazione tridimensionale. Gli scienziati possono ingegnerizzare le strutture ottenute per compiti diversi. Per esempio, alcuni segmenti di DNA possono ripiegarsi fino a formare contenitori che si aprono e liberano il contenuto solo quando il contenitore incontra una proteina importante per un processo patologico o condizioni acide in un tumore, spiega Yamuna Krishnan, professoressa di chimica alla Università di Chicago.

Krishnan e colleghi immaginano entità modulari più sofisticate, formate da DNA che può essere programmato per compiti diversi, come l'acquisizione di immagini o addirittura l'assemblaggio di altri nanorobot. Tuttavia il DNA sintetico è caro, costa circa 100 volte più dei materiali più tradizionali usati per portare a destinazione i farmaci. Per ora, dunque, i costi scoraggiano le aziende farmaceutiche dall'investire nel DNA come candidato terapeutico, spiega Krishnan.

Quanto detto finora può essere ancora lontano rispetto alla possibilità di costruire una flotta di sottomarini intelligenti che ricordano il *Proteus* del film di fantascienza *Viaggio allucinante*, del 1966. Finalmente però i nanorobot si stanno muovendo in quella direzione. ■

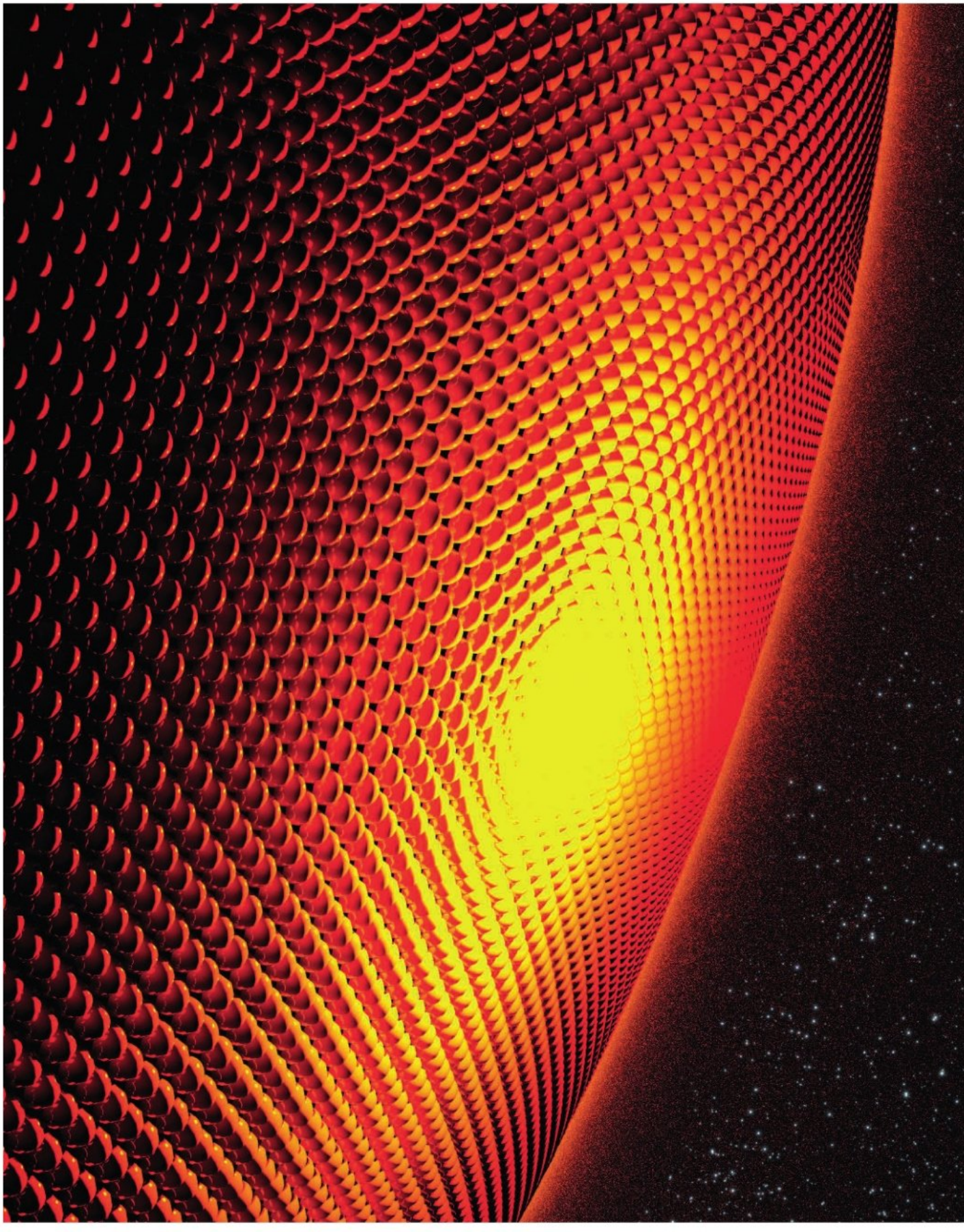
PER APPROFONDIRE

Motion Control at the Nanoscale. Wang J. e Manesh K.M., in «Small», Vol. 6, n. 3, pp. 338-345, 5 febbraio 2010.

Designer Nucleic Acids to Probe and Program the Cell. Krishnan Y. e Bathe M., in «Trends in Cell Biology», Vol. 22, n. 12, pp. 624-633, dicembre 2012.

Remotely Activated Mechanotransduction via Magnetic Nanoparticles Promotes Mineralization Synergistically with Bone Morphogenetic Protein 2: Applications for Injectable Cell Therapy. Henstock J.R. e altri, in «Stem Cells Translational Medicine», Vol. 3, n. 11, pp. 1363-1374, novembre 2014.

Chimica, amore e nanorobot. Smalley R.E., in «Le Scienze» n. 398, ottobre 2001.



FISICA

ANELLI DI FUOCO

I buchi neri potrebbero essere circondati da «muri di fuoco» di particelle, in contrasto con la relatività generale e la meccanica quantistica

di Joseph Polchinski

Precipitare in un buco nero non è mai stata una cosa divertente. Fin da quando i fisici sono giunti alla conclusione che i buchi neri esistono, sappiamo che avvicinarcisi troppo significa morte certa. Ma un tempo pensavamo che un astronauta che attraversasse il punto di non ritorno – l'orizzonte degli eventi – non avrebbe avvertito niente di speciale. Secondo la relatività generale di Einstein, nessun cartello segnala il punto dove le probabilità di riuscire a sfuggire si azzerano. A chiunque procedesse oltre l'orizzonte sembrerebbe solo di cadere, cadere, cadere in un pozzo di oscurità. Di recente però io e i miei colleghi abbiamo rivisto questa situazione alla luce di nuove informazioni sugli effetti della meccanica quantistica sui buchi neri. Ora pare che il nostro astronauta vivrebbe un'esperienza molto diversa rispetto alla previsione di Einstein.

Anziché cadere senza soluzione di continuità, all'orizzonte l'astronauta incontrerebbe un «muro di fuoco» di particelle ad alta energia che sarebbero istantaneamente letali. Il muro potrebbe addirittura segnare la fine dello spazio.

Tre anni fa, quattro di noi, all'epoca tutti all'Università della California a Santa Barbara, tra i quali Donald Marolf, sono arrivati a questa conclusione usando idee della teoria delle stringhe per studiare più da vicino la fisica dei buchi neri e in particolare un ragionamento proposto negli anni settanta da Stephen Hawking. Il fisico britannico aveva identificato un serio conflitto tra le previsioni della teoria quantistica e quelle della relatività. Secondo il suo ragionamento, o la meccanica quantistica o l'idea einsteiniana dello spazio-tempo avevano qualche lacuna. Da allora la battaglia per stabilire quale delle due sia corretta va avanti a sorti alterne.

Come la posizione originaria di Hawking, anche la nostra recente ipotesi sul muro di fuoco ha incontrato incredulità, ma ancora non è emersa nessuna alternativa soddisfacente. Se dobbiamo credere alla meccanica quantistica, i muri di fuoco sono una conseguenza, ma anche la loro esistenza porta a enigmi teorici. Sembra che noi fisici dobbiamo rinunciare a una delle nostre amate certezze, ma non siamo d'accordo su quale.

Speriamo però che da questa confusione emerga una visione più completa della meccanica quantistica e della relatività, e un modo per risolvere le apparenti contraddizioni tra queste due teorie sovrane della fisica.

Illustrazione di Kenn Brown, Mondolithic Studios

La singolarità

La relatività generale, da cui è nato il concetto stesso di buco nero, deriva l'idea di queste misteriose entità e del loro orizzonte degli eventi dal modo in cui spiega gli effetti della gravità sullo spazio e sul tempo. Secondo la teoria, una massa sufficientemente grande inizierà a collassare a causa dell'attrazione gravitazionale. Nulla può fermare questo processo finché tutta la massa non è compressa in un punto in cui lo spazio-tempo è infinitamente denso e curvo, una singolarità: in altre parole, un buco nero.

Un viaggiatore spaziale che superasse l'orizzonte degli eventi del buco nero non potrebbe più sfuggire all'attrazione gravitazionale e sarebbe attratto nella singolarità. Neppure la luce, una volta oltre l'orizzonte, può allontanarsi. La singolarità è un punto estremo, mentre l'orizzonte di per sé non dovrebbe avere niente di speciale, secondo il cosiddetto principio di equivalenza della relatività generale; gli individui in caduta libera in un buco nero, attraversando l'orizzonte, osserverebbero le stesse leggi fisiche osservate in qualunque altro punto. I teorici amano dire che, se anche il sistema solare stesse cadendo in un gigantesco buco nero in questo istante, noi non proveremmo nulla di diverso dal solito.

La radiazione del buco nero

La critica di Hawking all'immagine tradizionale dei buchi neri iniziò nel 1974, quando considerò una strana previsione formulata dalla meccanica quantistica. Secondo questa teoria, coppie formate da una particella e dalla sua controparte di antimateria appaiono di continuo e scompaiano quasi immediatamente. Hawking mostrò che se una fluttuazione di questo tipo si verifica appena fuori dall'orizzonte di un buco nero la coppia avrebbe potuto separarsi. Una delle particelle poteva cadere nella singolarità e l'altra sfuggire al buco nero e portarne via una piccola parte della massa. Grazie a questo fenomeno, detto «evaporazione di Hawking», prima o poi l'intera massa del buco nero avrebbe potuto esaurirsi.

Per i buchi neri che si trovano in natura l'evaporazione non è rilevante: questi buchi neri acquiscono massa molto più velocemente attraverso gas e polvere che precipitano al loro interno rispetto a quella che perdono per radiazione. Ma ai fini teorici possiamo indagare che cosa accadrebbe se un buco nero fosse isolato e avessimo tempo per osservarne il processo di evaporazione. Con questo esperimento mentale Hawking scoprì due apparenti contraddizioni tra relatività generale e meccanica quantistica.

Il problema dell'entropia. Riflettendo su questo sistema isolato, Hawking notò che lo spettro luminoso della radiazione che si allontana dal buco nero e che ora porta il suo nome, avrebbe lo stesso aspetto di quella di un corpo caldo che irradia, il che vuol dire che il buco nero ha una temperatura. In generale la temperatura è data dal movimento degli atomi all'interno di oggetti; la natura termica della radiazione di Hawking, quindi, faceva pensare che il buco nero avesse una struttura microscopica composta da componenti discreti di qualche tipo o bit. Il fisico Jacob D. Bekenstein, oggi alla Hebrew University di Gerusalemme, era già arrivato alla stessa conclusione due anni prima, con esperimenti mentali in cui venivano lanciati oggetti contro i buchi neri. I lavori di Bekenstein e Hawking ci danno una formula per il numero di bit, una grandezza nota come entropia del buco nero. L'entropia è una misura del disordine, che aumenta al crescere del numero di stati che un oggetto può avere. Più è grande il numero di bit in un buco nero, più è grande il numero di possibili disposizioni che possono avere, e quindi maggiore è l'entropia.

La relatività generale descrive invece un buco nero come dotato di una geometria omogenea, e indica che tutti i buchi neri con massa, momento angolare e carica fissati siano identici: come disse John Wheeler, grande fisico della Princeton University: «I buchi neri non hanno capelli». C'è quindi una contraddizione: la relatività afferma l'assenza di capelli, mentre secondo la meccanica quantistica i buchi neri hanno una grande quantità di entropia, che denota una certa struttura microscopica.

Il paradosso dell'informazione. L'evaporazione di Hawking pone una sfida anche alla teoria quantistica. Secondo i calcoli del fisico, le particelle che sfuggono al buco nero non dipendono dalle proprietà del materiale che ha formato il buco, in genere una stella massiccia collassata. Potremmo per esempio spedire nel buco nero un foglio con un messaggio, e non ci sarebbe poi modo di ricostruire il messaggio dalle particelle che emergerebbero. Una volta che il testo ha superato l'orizzonte, non può influenzare nulla di ciò che ne esce successivamente, perché dall'interno non può fuggire informazione. In meccanica quantistica ogni sistema è descritto da una formula, detta funzione d'onda, che codifica le probabilità che il sistema si trovi in un certo stato.
Nell'esperimento mentale di Hawking la perdita di informazione implica che non c'è modo di prevedere la funzione d'onda della radiazione di Hawking in base alle proprietà della massa che era entrata nel buco nero. La perdita di informazione è però esclusa dalla meccanica quantistica, dunque Hawking concluse che le leggi quantistiche andavano modificate per permettere una perdita del genere nei buchi neri.

Potreste dire: «Certo che i buchi neri distruggono l'informazione: distruggono qualsiasi cosa ci entri dentro!». Ma pensiamo a che cosa succede se ci limitassimo a bruciare il foglio: il messaggio verrebbe offuscato e sarebbe molto scomodo ricostruirlo dal

Joseph Polchinski è professore di fisica all'Università della California a Santa Barbara e membro permanente del Kavli Institute for Theoretical Physics della stessa università. Lavora in varie aree della fisica teorica.

IN BREVE

La scoperta di Stephen Hawking secondo cui dai buchi neri sfuggono particelle ha rivelato una crepa nella nostra comprensione della fisica. Questa fuga implicherebbe che dentro i buchi neri l'informazione è distrutta, violando la meccanica quantistica.

Un tentativo di risolvere il problema sfruttando la teoria delle stringhe sembrava promettente, ma recenti calcoli hanno mostrato che i buchi neri sono ancora più misteriosi di quanto ipotizzato.

I buchi neri sono circondati da barriere di particelle ad alta energia dette «muri di fuoco», secondo i calcoli dell'autore e dei suoi colleghi. Questi muri rappresentano forse la fine dello spazio stesso. Risolvere i paradossi dei muri di fuoco potrebbe aprire la strada verso l'unificazione tra meccanica quantistica e teoria generale della relatività.

Risolvere gli enigmi dei buchi neri

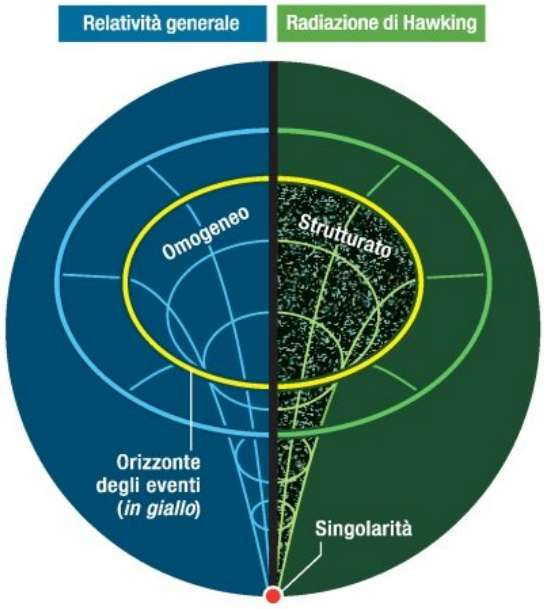
Nel 1974 Stephen Hawking mostrò che dai buchi neri fuoriesce una piccola quantità di radiazione. Secondo la meccanica quantistica, in tutto l'universo compaiono di continuo coppie costituite da una particella e dalla sua controparte di antimateria, per poi sparire dopo pochi istanti. Hawking osservò che quando una di queste coppie si forma vicino all'orizzonte di un buco nero, una particella può cadere dentro, mentre l'altra può sfuggire. Questo fenomeno, detto radiazione di Hawking, pone interrogativi sulle leggi della fisica nei buchi neri.

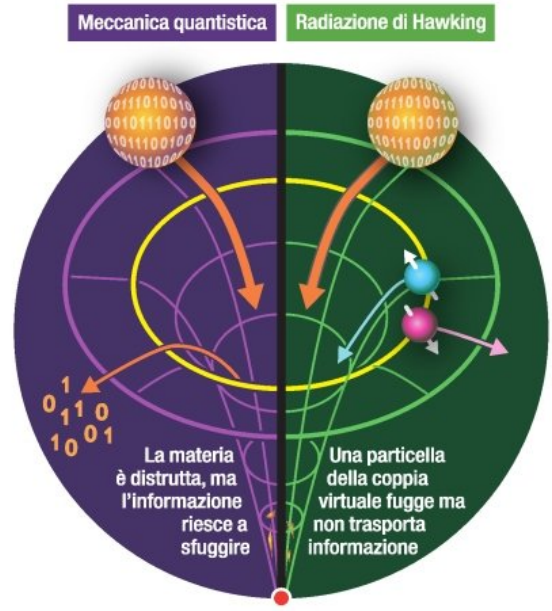
Il problema dell'entropia

Lo spettro dell'emissione di Hawking fa pensare che i buchi neri abbiano una temperatura. Tradizionalmente il calore emerge dal moto degli atomi in un oggetto. La temperatura dei buchi neri implicherebbe che abbiano una struttura interna: qualche tipo di componenti che si possono disporre in vari modi. Nella visione quanto-meccanica della radiazione di Hawking, questa possibilità di disposizioni diverse conferisce ai buchi neri un'entropia, che ne misurerebbe il disordine. Ma la relatività generale vieta che i buchi neri abbiano un'entropia: prevede che siano omogenei e senza struttura interna.

Il paradosso dell'informazione

Secondo la visione standard della meccanica quantistica, non è possibile distruggere informazione. Anche quando bruciamo una lettera, per esempio, l'informazione originaria codificata negli atomi della lettera è mantenuta nella cenere. La radiazione di Hawking, invece, implicherebbe che i buchi neri distruggono l'informazione relativa alla materia che vi cade dentro, perché le particelle che sfuggono non dipendono dalle proprietà degli atomi che erano caduti nel buco. Hawking ha suggerito che si dovrebbe modificare la meccanica quantistica per permettere la perdita di informazione.





Le congetture precedenti (*non mostrate*)...

Per risolvere questi enigmi, i fisici hanno cercato nuovi modi per unire relatività generale e meccanica quantistica in una teoria coerente che possa descrivere i buchi neri. Un importante passo avanti è stata la teoria delle stringhe, secondo cui le particelle sarebbero in realtà minuscole corde chiuse vibranti. Questa teoria sembrava risolvere almeno in parte il paradosso dell'informazione e il problema dell'entropia.

... hanno portato ai muri di fuoco

Le soluzioni date dalla teoria delle stringhe hanno però portato a una conclusione sorprendente: i buchi neri potrebbero essere circondati da muri di fuoco, pareti di particelle ad alta energia che cancellerebbero qualsiasi oggetto le incontrasse. I muri di fuoco sembrano implicare un tracollo delle leggi della fisica al confine dei buchi neri, e potrebbero portare a conclusioni estreme, come la possibilità che i muri di fuoco segnino la fine di spazio e tempo.

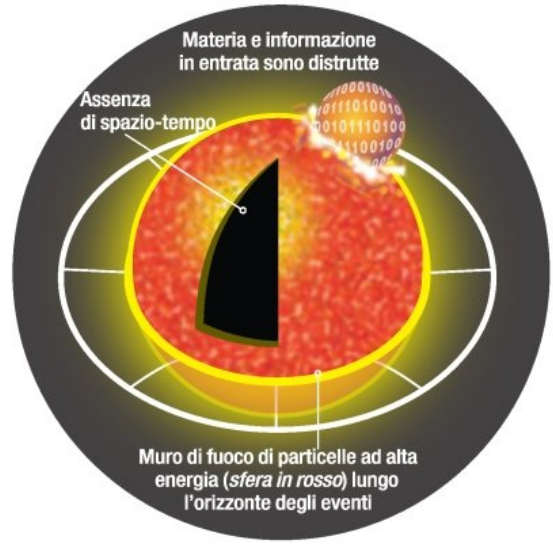


Illustrazione di Jen Christiansen

fumo. Ma il fenomeno della combustione è descritto dalla meccanica quantistica ordinaria, applicata agli atomi del foglio, e la descrizione quantistica del fumo sarebbe una precisa funzione d'onda che dipenderebbe dal messaggio originario. In teoria, quindi, il messaggio potrebbe essere ricostruito attraverso questa funzione. Nel caso dei buchi neri, invece, non ci sarebbe una funzione d'onda definita per la radiazione risultante.

In base a questa analogia molti teorici avevano concluso che Hawking avesse torto e che avesse confuso l'informazione resa indecifrabile con una vera perdita. Per giunta, secondo alcuni, se è possibile che si perda informazione, allora questo non accade solo nella situazione esotica dell'evaporazione di un buco nero, ma sempre e ovunque: in fisica quantistica, tutto quello che può succedere succede. Se Hawking avesse avuto ragione, ne vedremmo prove nella fisica di tutti i giorni, comprese probabilmente serie violazioni della legge di conservazione dell'energia.

Il ragionamento di Hawking, però, resiste a queste semplici obiezioni. A differenza della carta in fiamme, i buchi neri hanno orizzonti oltre i quali l'informazione non può sfuggire. Sembra quindi che ci troviamo di fronte a un paradosso: o modifichiamo la meccanica quantistica per permettere la perdita di informazione o modifichiamo la relatività per permettere all'informazione di allontanarsi dall'interno del buco nero.

C'è però anche una terza possibilità, che il buco nero non evapori completamente bensì alla fine ne rimanga un residuo microscopico che contiene tutta l'informazione della stella originaria che lo aveva creato. Anche questa «soluzione» ha però difficoltà. Per esempio, che un oggetto così piccolo contenga tanta informazione violerebbe l'idea di Bekenstein-Hawking dell'entropia.

Hawking ha cambiato idea sulla necessità che i buchi neri perdano informazione, perdendo anche una scommessa

Buchi neri e brane

La teoria delle stringhe è un tentativo di rettificare alcuni problemi che nascono quando relatività e meccanica quantistica si scontrano, come avviene nel caso dei buchi neri. Questa teoria sostituisce le particelle puntiformi delle teorie precedenti con minuscoli filamenti aperti o chiusi (*loop*), chiamati appunto stringhe, che eliminano alcune difficoltà matematiche che emergono quando si mettono insieme meccanica quantistica e relatività. Però sostituire i punti con stringhe non modifica immediatamente la situazione dei buchi neri.

Nel 1995, quando studiavo un altro tipo di esperimento mentale riguardante stringhe in spazi limitati, arrivò una svolta. Ampliando il lavoro che con altri colleghi avevamo effettuato qualche anno prima mostrai che la teoria delle stringhe, per come la capivamo allora, non era completa e richiedeva invece l'esistenza di oggetti con più delle tre dimensioni spaziali e quella temporale che ci sono familiari. Nei buchi neri questi oggetti con un numero maggiore di dimensioni, detti D-brane, sarebbero minuscoli, richiusi su se stessi in dimensioni nascoste troppo piccole per poterle individuare. L'anno successivo Andrew Strominger e Cumrun Vafa, oggi entrambi alla Harvard University, mostrarono che stringhe e D-brane insieme forniscono l'esatto numero di bit che rendono conto dell'entropia di un buco nero, almeno per certi casi molto simmetrici. L'enigma dell'entropia era così parzialmente risolto.

Il problema successivo era la perdita di informazione. A quel punto, nel 1997, Juan Maldacena, oggi all'Institute for Advanced Study a Princeton, elaborò un modo per aggirare la perdita dell'informazione, trovando una soluzione oggi conosciuta anche come dualità di Maldacena. Una dualità è un'equivalenza sorprendente tra due cose che sembrano molto diverse. La dualità di Maldacena mostra che la struttura matematica di una teoria che unifichi la meccanica quantistica e la gravità basandosi sulla teoria delle stringhe – una teoria quantistica della gravità – è equivalente a quella di una teoria quantistica ordinaria in un opportuno insieme di circostanze. In particolare, la fisica quantistica di un buco nero è equivalente a quella di un gas ordinario di particelle nucleari calde. Ciò significa anche che lo spazio-tempo è diverso da come lo percepiamo, semmai simile a un ologramma tridimensionale proiettato da una più fondamentale superficie bidimensionale di una sfera.

Usando la dualità di Maldacena i fisici trovano anche un modo per descrivere la meccanica quantistica dei buchi neri. Se le ipotesi di Maldacena sono vere, le ordinarie leggi quantistiche si applicano anche alla gravità e non si perde informazione. Grazie a un'argomentazione meno diretta si conclude che i buchi neri che evaporano non lasciano alcun residuo, quindi l'informazione esce con la radiazione di Hawking.

La dualità di Maldacena può essere considerata quanto di più vicino abbiamo a una teoria che unifichi relatività generale e meccanica quantistica: il suo creatore l'ha scoperta proprio studiando i rompicapi sull'entropia e la perdita di informazione riguardanti i buchi neri. Ancora non è stato dimostrato che sia vera, ma ha molte prove a suo favore, tanto che nel 2004 Hawking ha annunciato di aver cambiato idea sulla necessità che i buchi neri perdano informazione e ha pagato pubblicamente una scommessa fatta con il fisico John Preskill nel corso dell'International Conference on General Relativity and Gravitation a Dublino.

I fisici ritenevano che nessun osservatore avrebbe assistito a una violazione della relatività o di nessun'altra legge vicino a un buco nero che funzioni in base alle regole di Maldacena, sebbene la sua dualità abbia il limite di non spiegare in modo chiaro come l'informazione passi dall'interno di un buco nero al suo esterno.

Circa vent'anni fa, Leonard Susskind della Stanford University e Gerard 't Hooft dell'Università di Utrecht proposero una soluzione al problema originario dell'informazione che include una sorta di principio relativistico detto complementarità dei buchi neri. In sostanza, secondo questo ragionamento un osservatore che entrasse in un buco nero vedrebbe l'informazione all'interno, mentre uno che rimanesse fuori la vedrebbe uscire. Non c'è contraddizione, perché i due osservatori non possono comunicare.

Il muro di fuoco

La dualità di Maldacena e la complementarità dei buchi neri sembravano dissolvere tutti i paradossi, ma molti dettagli andavano ancora completati. Tre anni fa con i miei colleghi abbiamo cercato di creare un modello del quadro complessivo, basandoci sulle idee di Samir Mathur, della Ohio State University, e Steven Giddings, dell'Università della California a Santa Barbara (ed estendendo, senza saperlo, un ragionamento preesistente di Samuel Braunstein dell'Università di York). Dopo aver tentato per lungo tempo senza successo di trovare un modello funzionante, abbiamo capito che il problema non era una nostra incapacità matematica, ma il fatto che c'era ancora una contraddizione.

Questa contraddizione emerge quando consideriamo il fenomeno dell'*entanglement* quantistico, l'aspetto meno intuitivo e più lontano dall'esperienza quotidiana della teoria quantistica. Se le particelle fossero dadi, due particelle *entangled* sarebbero due dadi la cui somma dei punteggi è sempre sette: se li tiriamo e con un dado otteniamo due, l'altro darà sempre cinque, e così via. Analogamente, quando si misurano le proprietà di una particella entangled, questa misurazione determina anche le caratteristiche della sua compagna. Un'ulteriore conseguenza della fisica quantistica è che una particella può essere entangled solo con un'altra: se la particella *B* lo è con la particella *A*, allora non può esserlo anche con la *C*. L'entanglement è monogamo.

Nel caso del buco nero, pensiamo a un fotone di Hawking; chiamiamolo *B* e diciamo che è stato emesso dopo che il buco nero è evaporato per metà. Il processo di Hawking implica che *B* sia parte di una coppia e chiamiamo *A* il suo compagno che cade nel buco nero. *A* e *B* sono entangled. Inoltre, l'informazione che originariamente era caduta nel buco nero è stata codificata in tutte le particelle della radiazione di Hawking. Ora, se l'informazione non si perde e se il fotone *B* di Hawking che si trova all'esterno è in uno stato quantistico definito, deve essere entangled con qualche combinazione *C* di altre particelle di Hawking già sfuggite (altrimenti in quello che viene emesso non si conserverebbe l'informazione). Ma così abbiamo una contraddizione: poligamia!

Il prezzo da pagare per salvare la meccanica quantistica, mantenendo l'entanglement tra *B* e *C* e non avendo nient'altro di anormale fuori dal buco nero, è la perdita dell'entanglement tra *A* e *B*. Quando avevano cominciato a esistere come effimera coppia particella-antiparticella, i fotoni di Hawking *A* e *B* erano apparsi rispettivamente vicino all'interno e all'esterno dell'orizzonte. Nella teoria quantistica, per spezzare questo entanglement si paga in energia, come quando si spezza un legame chimico. La rottura dell'entanglement per tutte le coppie di Hawking implica che l'orizzonte sia una parete di particelle ad alta energia, che abbiamo chiamato «muro di fuoco». Un astronauta in caduta, invece di muoversi liberamente attraverso l'orizzonte, incontrerebbe uno stacco netto.

Una simile divergenza dalla relatività generale – un muro di energia dove invece non dovrebbe accadere nulla di insolito – era fastidiosa, tuttavia il discorso era semplice, e non ci trovavamo alcun difetto. In un certo senso avevamo ripercorso il ragionamento di Hawking all'inverso, ipotizzando che l'informazione non si perda e vedendo a che cosa portava questa premessa. Così abbiamo concluso che invece di sottili effetti di complementarità c'è un drastico cedimento della relatività generale. Quando abbiamo iniziato a descrivere il ragionamento ad altri colleghi, la reazione ricorrente era di scetticismo, seguito dalla stessa perplessità che avevamo provato noi.

O questi strani muri di fuoco esistono davvero, oppure sembra proprio che dobbiamo pensare di abbandonare alcuni dei principi più radicati della teoria quantistica. L'informazione non si può distruggere, tuttavia forse assisteremo a qualche modifica alla meccanica quantistica. Purtroppo l'osservazione di veri buchi neri non porterà a una risposta, perché eventuali radiazioni da un muro di fuoco sarebbero indebolite dall'attrazione gravitazionale del buco nero stesso, rendendo così il muro estremamente difficile da osservare.

La fine dello spazio

E poi, se il muro di fuoco esiste, che cos'è? Un'idea è che sia semplicemente la fine dello spazio. Forse nel buco nero non ci sono le condizioni che permettono la formazione dello spazio-tempo. Come ha osservato una volta Marolf, forse l'interno non si forma perché «la memoria quantistica del buco nero è piena». Se dentro non si ha uno spazio-tempo, vuol dire che lo spazio finisce all'orizzonte e che un astronauta in caduta, colpendolo, si dissolve in bit quantistici che si trovano su questo confine.

Per evitare situazioni così bizzarre, i fisici hanno cercato di aggirare le conclusioni relative al muro di fuoco. Un'idea è che, visto che la particella B della radiazione di Hawking deve essere entangled sia con A sia con C, allora A deve essere parte di C: il fotone al di là dell'orizzonte è in qualche modo lo stesso bit codificato nella precedente radiazione di Hawking, sebbene si trovino in posti molto diversi. Questo concetto non è lontano dall'idea originaria della complementarità dei buchi neri, ma per ottenere un modello concreto di questo scenario occorre modificare ulteriormente la meccanica quantistica. L'idea più rivoluzionaria, dovuta a Maldacena e a Susskind, è che ogni coppia di particelle entangled sia collegata da un microscopico *wormhole* di spazio-tempo, in modo che grandi regioni dello spazio-tempo, come l'interno di un buco nero, possano essere formate da grandi quantità di entanglement.

Un limite nella formulazione della gravità quantistica impedisce di concludere se il muro di fuoco sia o meno reale

Hawking ha proposto che per i buchi neri la relatività generale funziona mentre la meccanica quantistica viene meno. Maldacena ha concluso che non serve modificare la meccanica quantistica ma che lo spazio-tempo è olografico. Forse la verità è da qualche parte nel mezzo.

Sono state proposte molte altre idee, la maggior parte delle quali abbandona qualche principio di lungo corso, e non c'è unanimità sulla direzione da prendere per risolvere i problemi. Una domanda ricorrente è: quali conseguenze avrebbero i muri di fuoco per i buchi neri esistenti, come quello al centro della Via Lattea? È troppo presto per dare una risposta.

Per ora gli scienziati sono entusiasti di aver scoperto una nuova contraddizione tra due delle teorie centrali della fisica. La nostra incapacità di arrivare a una conclusione sulla reale esistenza del muro di fuoco mette allo scoperto un limite nelle attuali formulazioni della gravità quantistica, e così i fisici teorici riconsiderano le loro ipotesi fondamentali sul funzionamento dell'universo. Ne potrà emergere una comprensione più profonda della natura dello spazio, del tempo e dei principi alla base di tutte le leggi della fisica. In definitiva, risolvendo le difficoltà dei muri di fuoco attorno ai buchi neri potremmo avere finalmente l'occasione per unificare meccanica quantistica e relatività generale in un'unica teoria funzionante. ■

PER APPROFONDIRE

La guerra dei buchi neri. Susskind L., Adelphi, Milano 2009.

Black Holes: Complementarity or Firewalls? Almheiri A., Marolf D., Polchinski J. e Sully J., in «Journal of High Energy Physics», Vol. 2013, n. 2, articolo n. 62, febbraio 2013. Preprint disponibile all'indirizzo **http://arxiv.org/abs/1207.3123.**

I buchi neri e il paradosso dell'informazione. Susskind L., in «Le Scienze» n. 346, giugno 1997.

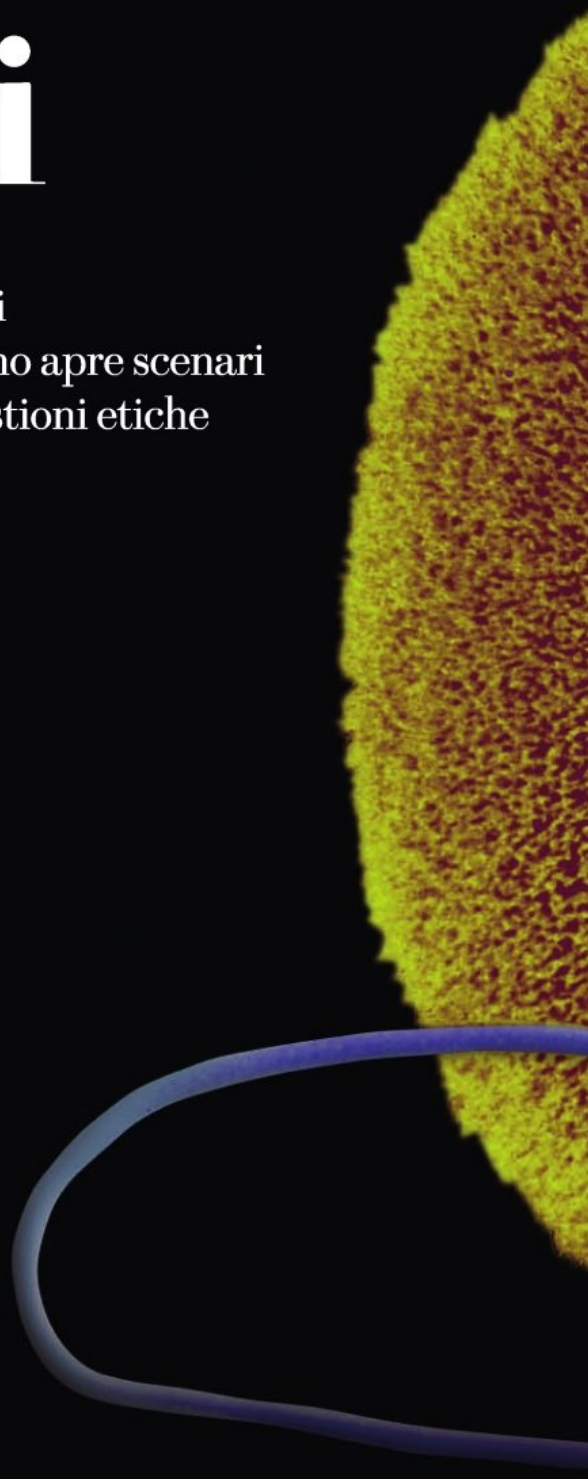
L'informazione in un universo olografico. Bekenstein J.D., in «Le Scienze» n. 421, settembre 2003.

L'illusione della gravità. Maldacena J., in «Le Scienze» n. 449, gennaio 2006.

Gameti artificiali

La possibilità di produrre uova e spermatozoi riprogrammando cellule adulte dell'organismo apre scenari biomedici rivoluzionari e pone profonde questioni etiche

di Carlo Alberto Redi e Manuela Monti



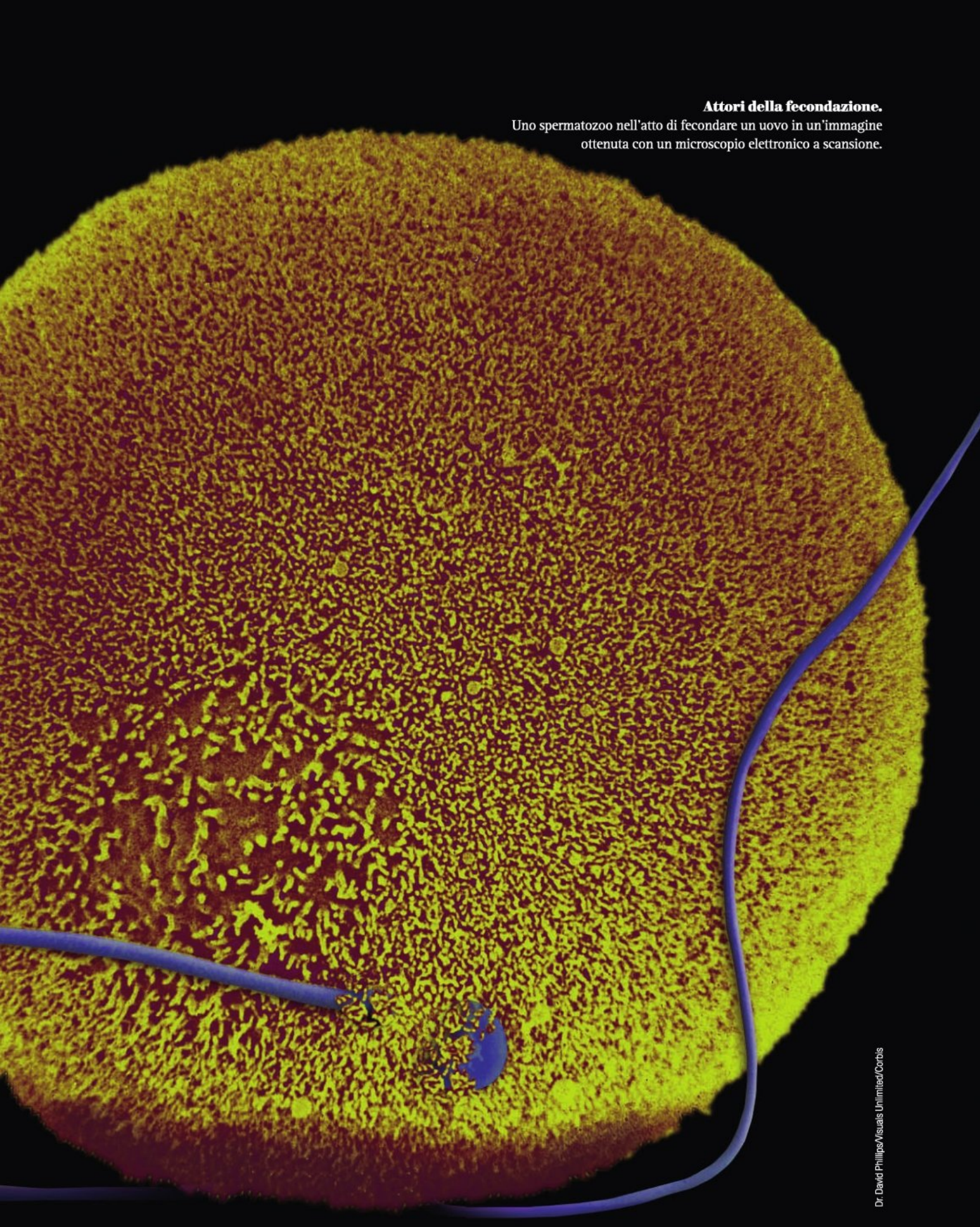
IN BREVE

È ragionevole ritenere che nei prossimi cinque anni sarà possibile il prelievo di cellule dalla pelle di uomini e donne infertili, da cui derivare cellule staminali pluripotenti da convertire in spermatozoi e uova.

Simili procedure sono già state sviluppate nel topo. Inoltre è stato dimostrato che, se trapiantate nei tubuli seminiferi di topi, staminali pluripotenti indotte (iPS) ottenute da cellule della pelle di uomini incapaci di produrre spermatozoi producono spermatozoi umani.

Nel topo è anche possibile la produzione di uova da iPS, uova in grado di essere fecondate e produrre progenie fertile. Dunque dalla pelle di donne sterili si potranno ottenere uova. La necessità di impiegare topi come bioreattori sarà superata e il processo di genesi dei gameti avverrà *in vitro*.

Queste ricerche suggeriscono la possibilità di derivare addirittura cellule uovo dalla pelle di uomini e spermatozoi dalla pelle di donne, gameti da individui senescenti, progenie dallo stesso individuo o da individui dello stesso sesso. Questi gameti artificiali potranno certo essere usati per la terapia della sterilità. Ma le nuove tipologie di genitorialità all'orizzonte necessitano di un'approfondita discussione.



Attori della fecondazione.
Uno spermatozoo nell'atto di fecondare un uovo in un'immagine ottenuta con un microscopio elettronico a scansione.

Dr. David Phillips/Visuals Unlimited/Corbis

Manuela Monti è contrattista della Direzione scientifica della Fondazione IRCCS Policlinico «San Matteo» di Pavia. Studia l'espressione genica nelle ultime fasi differenziative degli oociti e nelle primissime fasi di sviluppo dello zigote svolgendo ricerche con il National Institute on Aging di Baltimora e con il Cell Cycle Genetics Research Group dell'Università di Cambridge.

Carlo Alberto Redi è professore di biologia dello sviluppo all'Università di Pavia e accademico dei Lincei. Si interessa della composizione del citoplasma degli oociti e della loro capacità di riprogrammare geneticamente i nuclei delle cellule somatiche.

Da sempre una delle domande chiave della biologia riguarda l'origine nel corso dello sviluppo embrionale delle cellule germinali, ovvero uova e spermatozoi, a partire da un'unica cellula, lo zigote. Ancora non abbiamo la piena comprensione di questo processo dal punto di vista molecolare e restano da chiarire molti meccanismi, intrinseci ed estrinseci al genoma, che governano la differenziazione in senso somatico o germinale delle prime cellule embrionali. Le cellule somatiche, quelle cioè che costituiscono il nostro corpo, vanno perse a ogni generazione, mentre le cellule germinali sono caratterizzate dalla proprietà di passare da una generazione alla successiva.

Mortalità e immortalità sono potenti categorie concettuali, affascinanti e straordinarie. Non stupisce dunque che la scienza si occupi da tempo della rigenerazione delle cellule germinali quando queste vengano a mancare per malattia o senescenza.

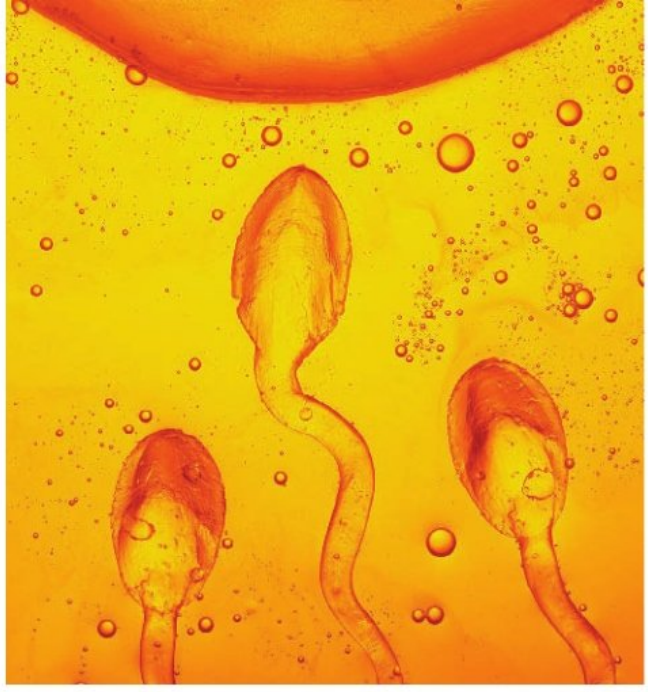
Il mondo della ricerca biomedica e veterinaria ha sempre avuto un interesse primario nella produzione di cellule germinali da cellule somatiche. Questa aspirazione trascende il desiderio di controllare del tutto e in modo artificiale la storia del ciclo vitale dell'essere umano (*si veda l'illustrazione a fronte*). Più pragmaticamente, c'è un interesse a sviluppare tecniche utili alla produzione alimentare, alla conservazione di specie a rischio di estinzione e, nell'ambito umano e per citare un solo esempio, alla necessità di disporre di spermatozoi e uova per trattare condizioni di sterilità: l'epidemiologia indica in 1 su 6 il numero di coppie affette da sterilità, con uno dei due partner incapace di procreare.

L'avanzamento delle conoscenze nella biologia delle cellule staminali, cioè cellule indifferenziate che possono trasformarsi nei diversi tipi cellulari che compongono il nostro organismo, ha rivoluzionato lo scenario di questi interessi. In particolare le scoperte hanno reso più veloce il raggiungimento di importanti traguardi, per esempio ottenere cellule germinali da cellule somatiche. Possiamo ipotizzare questi obiettivi perché il paradigma concettuale di staminalità (si veda *Cellule sempre nuove*, in «Le Scienze» n. 392, aprile 2001) permette ricerche utili a conoscere i processi di differenziazione delle cellule, partendo da cellule indifferenziate, e a riprodurre artificialmente questi processi, portando cellule indifferenziate a differenziarsi nel tipo cellulare desiderato. A partire dai classici contributi di trapianto di cellule del midollo osseo in ambito ematologico, l'impiego di terapie cellulari in medicina rigenerativa si è imposto a livello internazionale grazie a tecnologie che in un paio di decenni hanno permesso di disporre del «reagente biologico» necessario: i diversi tipi di cellule. In altre parole, oggi la biologia delle cellule staminali permette non solo di trattare in modo efficace tumori del sangue, ma anche altre condizioni patologiche, dai grandi ustionati alla rigenerazione della cornea.

Lo strumento della pluripotenza

Tra le diverse sorgenti di staminali, quelle pluripotenti indotte (o iPS, da *induced pluripotent stem cell*) si sono rivelate particolarmente promettenti. Ottenute per la prima volta nel 2006 dal giapponese Shinya Yamanaka, dell'Università di Kyoto, grazie anche agli studi pionieristici del britannico John Gurdon, entrambi premi Nobel per la medicina nel 2012, le iPS sono caratterizzate dalla pluripotenza staminale tipica delle cellule embrionali e, fatto di grande rilievo, sono ottenute impiegando solo cellule somatiche senza la creazione o distruzione di embrioni.

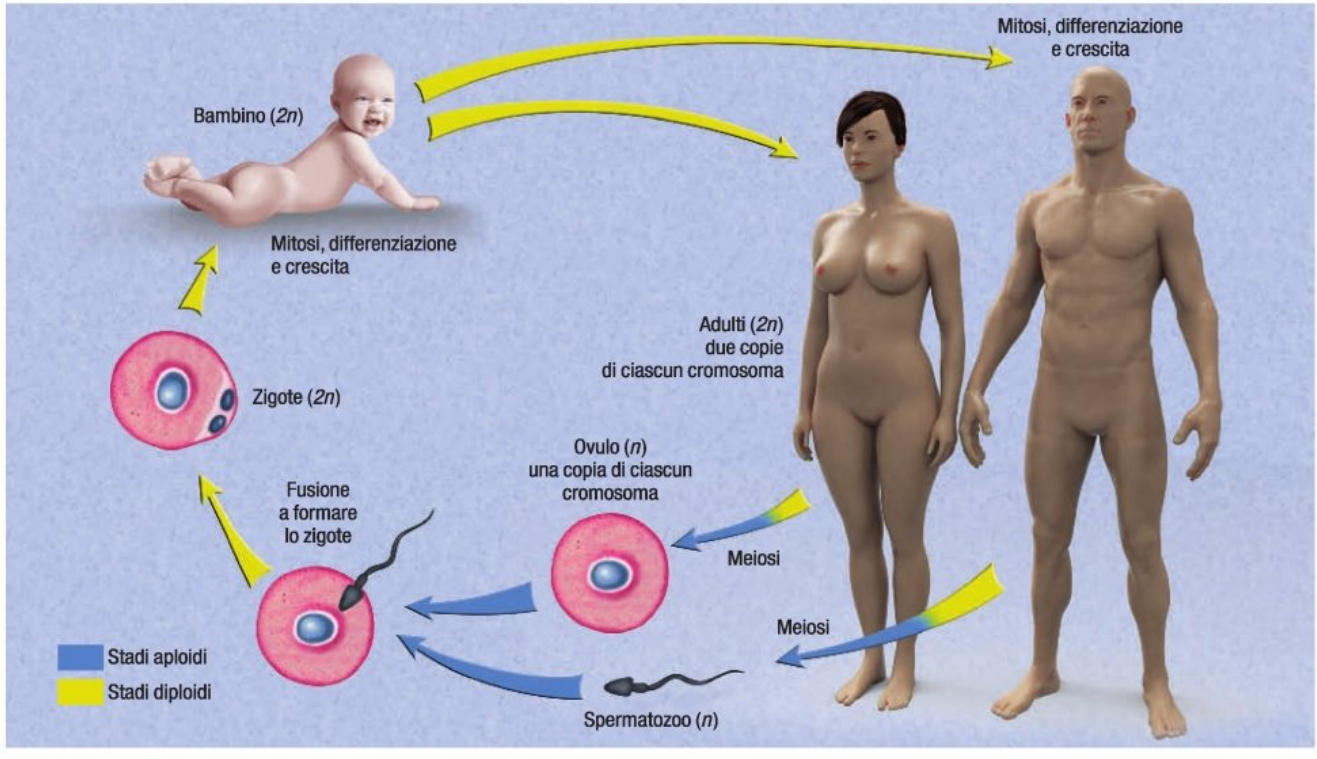
L'induzione di pluripotenza è un processo di riprogrammazione genetica capace di produrre cellule simili a quelle embrionali da cellule somatiche. Una volta ottenute queste cellule simili alle embrionali è possibile differenziarle in pressoché tutti i tipi cellu-



In dirittura di arrivo. Nel caso dei topi la tecnologia per ottenere in provetta spermatozoi e uova è ben sviluppata, mentre è ancora in fase di sviluppo per gli esseri umani; sotto, il nostro ciclo vitale.

della moltiplicazione cellulare per meiosi, la divisione che separa le coppie di cromosomi nei gameti, rispetto a quella per mitosi, in cui si conserva il numero di coppie di cromosomi. Le cellule germinali si moltiplicano per mitosi, come quelle somatiche, quando ancora si trovano in uno stato indifferenziato. Nelle fasi finali del differenziamento in gameti, però, le cellule germinali entrano in meiosi e si dividono, riducendo a metà il contenuto del corredo genetico (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Questa riduzione di DNA assicura che, una volta avvenuta la fusione tra spermatozoi e uova al momento della fecondazione, si ricostituisca il corredo genetico tipico della specie.

Per ottenere spermatozoi e uova artificiali, i biologi hanno ripercorso le tappe dello sviluppo embrionale che portano alla lo-



lari. In questo promettente panorama si inserisce la possibilità di derivare spermatozoi e uova umane, mature e funzionali, da cellule somatiche, per esempio cellule della pelle, con l'obiettivo di trattare le infertilità umane. Il mondo biologico e quello veterinario hanno un interesse primario, e infatti svolgono un ruolo di primo piano nella ricerca, con risultati interessanti: la tecnologia per produrre spermatozoi e uova *in vitro* è recente e ben sviluppata nei topi, mentre nell'essere umano è in fase di sviluppo.

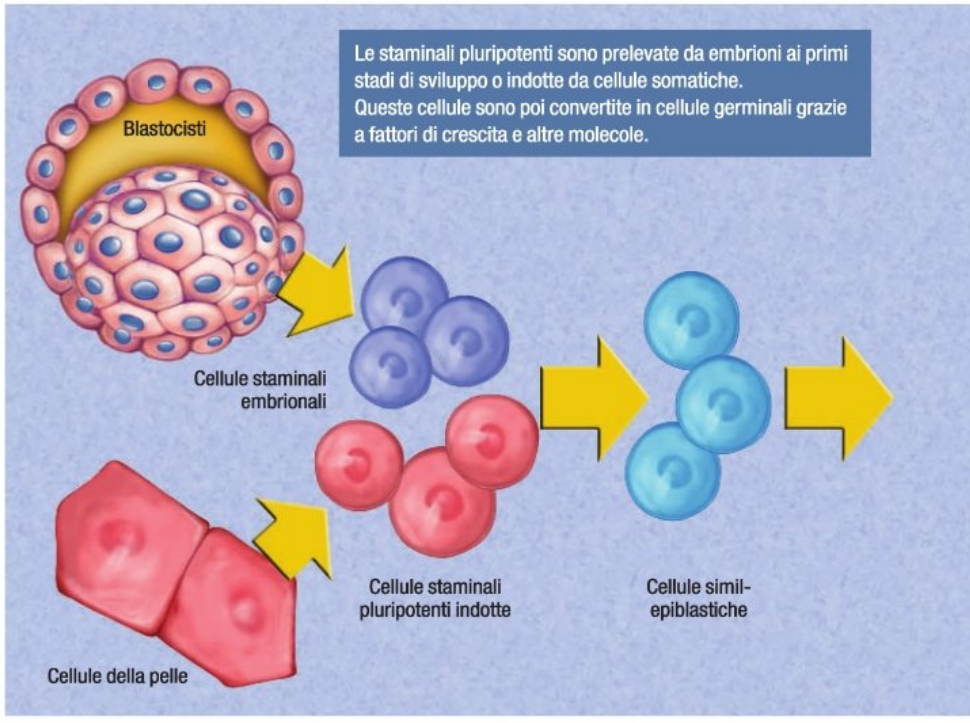
Da tempo i biologi sono riusciti a differenziare ogni tipo di cellula partendo da precursori staminali. Ma nel caso delle cellule germinali l'esercizio di coltura e differenziamento cellulare è più arduo. Ciò è dovuto al fatto che il programma genetico che porta alla differenziazione di spermatozoi e uova non è noto con precisione e comunque si basa su circuiti di espressioni geniche assai complessi. Basti pensare alla fine regolazione genetica alla base ro formazione: dalle prime cellule embrionali si origina un epitelio, l'epiblasto embrionale, al cui interno si differenziano le cellule germinali primordiali che in seguito si sviluppano in gameti maturi. Seguendo questa gerarchia differenziativa, nel 2011 il gruppo di Mitinori Saitou, dell'Università di Kyoto, ha dimostrato su «Cell» di aver ottenuto spermatozoi capaci di fecondare e produrre progenie fertile da staminali embrionali e cellule iPS di topo, indotte a trasformarsi in cellule germinali primordiali. Per ottenere spermatozoi funzionali è necessario iniettare queste cellule germinali primordiali nel testicolo di topi sterili in modo da assicurare loro l'entrata nei tubuli seminiferi che costituiscono la «nicchia» fisiologica dove avviene la spermatogenesi, una nicchia ricca di tutti gli stimoli fisici e chimici necessari all'ulteriore differenziamento verso le forme mature di spermatozoi.

Nel 2012 lo stesso gruppo si è poi cimentato nella più com-

Dennis Wilson/Corbis (*spermatozoi*); illustrazione di Elisa Botton, su indicazione degli autori

Riprodurre la riproduzione

Nei topi di laboratorio è già possibile ripercorrere il processo di creazione di gameti artificiali, uova e spermatozoi perfettamente funzionali che portano a progenie, grazie agli studi recenti degli scienziati giapponesi Mitinori Saitou e Katsuhiko Hayashi, entrambi dell'Università di Kyoto. Il punto di partenza sono cellule staminali pluripotenti indotte, o iPS, che possono essere prelevate da embrioni alla fase di sviluppo di blastocisti, o più di frequente dalla riprogrammazione di cellule adulte dell'organismo, in modo da aggirare le questioni etiche connesse all'uso di embrioni. Dalle cellule iPS, Saitou e Hayashi hanno ottenuto uova e spermatozoi che poi sono stati impiegati in fecondazioni in vitro. Le uova fecondate sono state infine trasferite in madri surrogate. Ora le ricerche, non solo degli scienziati giapponesi, sono orientate a ottenere gli stessi risultati negli esseri umani.



plessa operazione di produrre uova, come illustrato su «Science», sulla scorta dei successi pubblicati nel 2003 dal gruppo di Hans Schöler, del Max-Planck-Institut für molekulare biomedizin, sempre su «Science». L'uovo è un miniaturizzato, meraviglioso, laboratorio di biologia molecolare (si veda *Uovo: storia di una cellula*, di Manuela Monti e Carlo Alberto Redi, in «Le Scienze» n. 524, aprile 2012) capace di sostenere tutti i processi dello sviluppo embrionale.

Usando staminali embrionali e cellule iPS, e seguendo le prime fasi di lavoro impiegate per differenziare spermatozoi, i ricercatori giapponesi hanno coltivato questi due tipi cellulari in un terreno modificato con l'aggiunta di particolari cocktail di molecole capaci di indurne la trasformazione in cellule germinali primordiali. Per ottenere uova, Saitou e colleghi hanno poi seguito la strategia detta dell'ovario ricostituito (*reconstituted ovary*). In questa strategia, le cellule germinali primordiali sono state trapiantate sotto la borsa ovarica di topoline immunodepresse, o «nude» in gergo tecnico. In questo modo è stato possibile fornire la componente somatica, cioè la nicchia, alle cellule germinali primordiali prodotte in laboratorio, che si sono differenziate in cellule uovo mature capaci di essere fecondate, formare zigoti e una volta trapiantate in pseudomadri di sostenere lo sviluppo embrionale e fetale di nuovi individui. Questi ultimi, una volta nati e raggiunta la maturità sessuale, sono risultati a loro volta fertili.

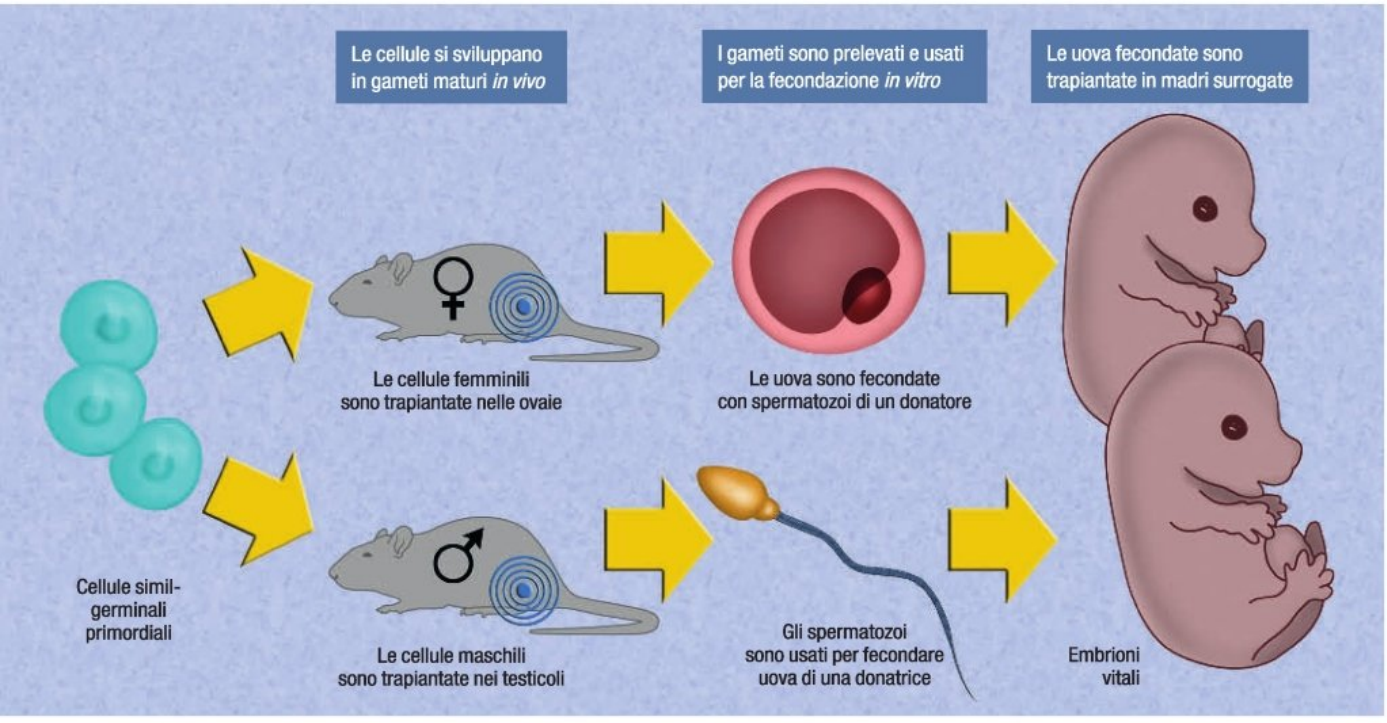
Dal topo all'essere umano

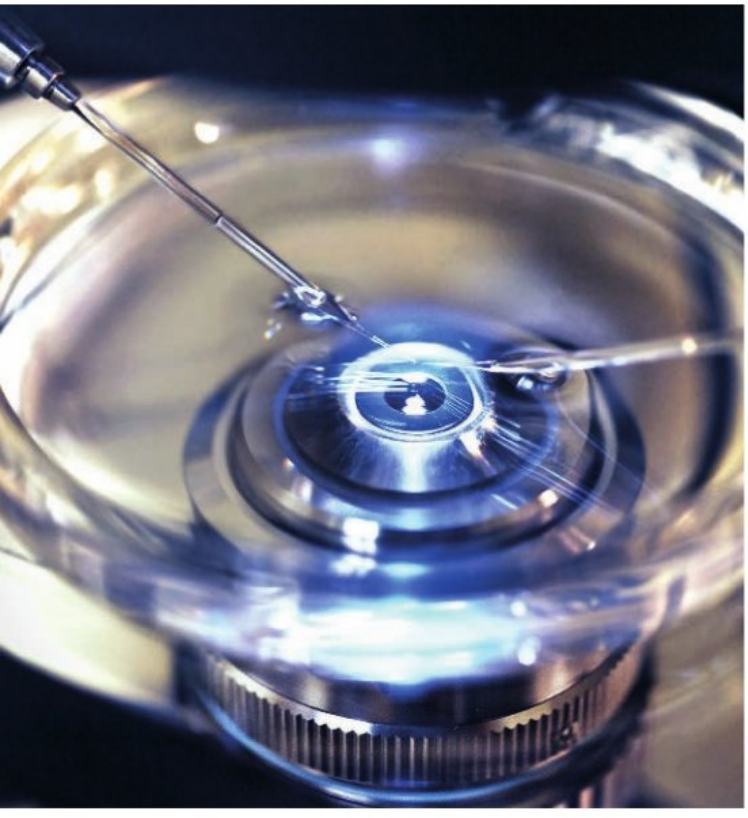
A fronte di questi successi nel topo, gli scienziati ipotizzano che nei prossimi 5-7 anni sarà possibile anche nell'essere umano prelevare cellule della pelle di individui infertili (uomini e donne), da cui derivare staminali pluripotenti indotte che poi saranno convertite in cellule germinali capaci di produrre spermatozoi e uova con processi in vitro. Una volta ottenuti, spermatozoi e uova possono essere impiegati nelle procedure classiche di fecondazione in vitro. Va però precisato che il prerequisito essenziale messo in luce da tutti questi studi è la necessità di una «nicchia» funzionale in cui inserire le cellule germinali prodotte. È chiaro che le cellule germinali dipendono dagli stimoli fisiologici della nicchia, che non è ancora sostituibile in vitro e che necessita di un «bioreattore» in vivo, generalmente topi immunodepressi. Inoltre è stato osservato che le cellule germinali primordiali che sedimentano fuori della nicchia si sviluppano in cellule tumorali. Quest'ultimo dato è di estremo interesse sotto il profilo delle conoscenze, e lo è anche in termini pratici, dato che suggerisce di non percorrere questa via breve per produrre gameti di individui sterili; il rischio di indurre un tumore nel paziente è troppo alto, e rende inaccettabile una simile scelta terapeutica.

Per ottenere cellule germinali perfettamente differenziate è necessario condurre ulteriori ricerche, e in particolare fare luce su due punti: come cancellare la memoria epigenetica – che riguarda modifiche nella struttura della molecola del DNA che influiscono sull'espressione dei geni, ma non riguarda modifiche nella sequenza del DNA – del tipo cellulare usato per derivare le iPS necessarie a differenziare gameti; e poi capire come identificare le condizioni di coltura cellulare capaci di mimare il contesto biochimico e biofisico della nicchia delle cellule germinali.

A questo riguardo, negli ultimi anni sono stati fatti significativi passi avanti nell'identificazione dei requisiti molecolari per la formazione di cellule germinali di topo a partire da cellule somatiche riprogrammate geneticamente a cellule staminali. Nel 2013, su «Nature», Fumio Nakaki dell'Università di Kyoto ha mostrato che un ridotto numero di fattori di trascrizione, che nel topo include PRDM1, PRDM14, e TFAP2C, svolge un ruolo chiave nel «cancellare» il programma genetico della cellula somatica, imporre quello di cellula embrionale e quindi riprogrammare ge-

Ted Horowitz/Corbis (a fronte); illustrazione di Elisa Botton, su indicazione degli autori





Fecondazione assistita 2.0. Un passaggio della fecondazione in vitro, in cui uno spermatozoo del donatore è iniettato in un ovocita. In un futuro questa tecnica potrà includere anche spermatozoi e uova ottenuti dalla riprogrammazione di cellule adulte.

neticamente quello di cellula germinale. Anche solo PRDM14 appare sufficiente per convertire in vitro cellule somatiche di topo a cellule germinali primordiali capaci, una volta trapiantate, di dare origine a una robusta spermatogenesi e a una progenie fertile. Gli studi sui topi hanno chiarito più in dettaglio che le cellule germinali primordiali si specificano a partire da quelle epiteliali a 6,5 giorni di sviluppo embrionale (che nel topo dura 20 giorni) in risposta a uno stimolo esercitato dalla proteina BMP4 capace di determinare la produzione di altre due proteine, BLIMP1 e PRDM14. Questa circuiteria di espressione proteica agisce in maniera combinatoria nel reprimere l'azione di geni somatici e nell'indurre quella di geni tipici delle cellule germinali. È possibile mimare questo processo in vitro in particolari condizioni di coltura cellulare.

Nella sperimentazione con cellule umane, il dato più recente è stato ottenuto dal gruppo della Stanford University guidato da Renee Reijo Pera. In uno studio pubblicato nel 2014 su «Cell Reports», Reijo Pera e colleghi hanno dimostrato che staminali pluripotenti indotte umane con delezioni nel cromosoma Y associate a severe azoospermie, cioè mutazioni che implicano la perdita di molecole che compongono il DNA, non portano a termine la differenziazione in cellule germinali in vitro, come già osservato nei topi. Per arrivare alla completa differenziazione è stato necessario trapiantare queste iPS nei tubuli seminiferi di un bioreattore, ovvero topi nudi: qui le staminali pluripotenti hanno acquisito caratteristiche simili a quelle germinali che le rendono indistinguibili dalle cellule germinali fetali, e sono state in grado di esprimere tutti i marcatori specifici di queste cellule, e in particolare la proteina PRDM14, in analogia con quanto già dimostrato in topo.

La proteina PRDM14 è un fattore di regolazione dell'espressione genica in grado di modificare l'attività degli istoni, cioè delle proteine che ricoprono il DNA, e ha un ruolo cruciale nel soppri-

mere l'espressione di geni del differenziamento cellulare mentre mantiene attivi quelli legati alla pluripotenza staminale. Il corrispondente gene *PRDM14* è in grado di regolare la riacquisizione della pluripotenza staminale nelle cellule somatiche, tanto che è uno dei geni implicati nello sviluppo del tumore del seno. In particolare, *PRDM14* regola la pluripotenza nel corso della differenziazione delle cellule germinali inducendo l'espressione (tramite legame con i rispettivi promotori) di due geni master della staminalità, *SOX2* e *OCT4*.

Di grande rilievo per la biologia delle cellule staminali è il fatto che le cellule trapiantate che non si localizzano nei tubuli seminiferi, ma vanno a depositarsi a livello extratubulare, portano alla formazione di tumori primari. Questo dato va letto in una duplice cornice: da un lato testimonia la buona natura di cellule staminali di queste cellule, perché soddisfano uno dei criteri di definizione di staminale embrionale pluripotente, e cioè la capacità di generare tumori e teratocarcinomi; d'altro lato sottolineano il ruolo svolto dal microambiente della nicchia nel fornire un ampio repertorio di stimoli biofisici e biochimici necessari al processo di differenziazione in cellula germinale. Inoltre questi dati suggeriscono che lo xenotrapianto di cellule iPS umane, ovvero il trapianto in un'altra specie, in questo caso il topo, è una possibile soluzione biotecnologica per ottenere cellule germinali funzionali. Il lavoro di ricerca è ora concentrato sull'ottenere spermatozoi e uova da queste cellule in vitro e senza doverle iniettare in un topo. Si tratta di decifrare i segnali che la nicchia del tubulo seminifero e dell'ovario inviano alle cellule germinali primordiali. Una volta scoperti questi segnali, sarà possibile aggiungerli alla coltura di cellule germinali primordiali e ottenere in vitro spermatozoi e uova.

Il quadro delineato fin qui per la produzione di gameti maturi può essere ampliato in funzione di nuove fonti di cellule staminali. Al centro di medicina rigenerativa della Fondazione IRCCS Policlinico «San Matteo» di Pavia, in collaborazione con il gruppo di Reijo Pera, effettuiamo ricerche mirate a ottenere, dai cordoni ombelicali non ritenuti idonei alla conservazione, staminali chiamate *very small embryonic like* (VSEL). Inoltre stiamo sviluppando per queste cellule protocolli di coltura, espansione e differenziazione verso tipi cellulari germinali (si veda *Staminali dal cordone ombelicale*, di Cesare Perotti, Claudia Del Fante e Carlo Alberto Redi, in «Le Scienze» n. 509, gennaio 2011). Il successo nell'ottenere spermatozoi e uova funzionali costituisce anche un potente strumento per lo studio degli elementi basilari delle fasi più precoci che caratterizzano lo sviluppo embrionale nei mammiferi.

Difficoltà non eterne

La capacità sperimentale messa in evidenza da queste ricerche in cui si ottengono spermatozoi e uova non può indurre a ritenere che siano noti tutti i dettagli dei processi che portano a queste cellule. In effetti queste ricerche sono ancora più importanti per l'impresa scientifica, perché costituiscono un formidabile mezzo con cui chiarire quegli stessi processi.

Non ci si deve lasciare abbagliare dal risultato. È più rilevante aver messo a punto il sistema ora impiegato come mezzo di indagine. Nella realtà è stato portato in provetta tutto il processo di gametogenesi che così può essere studiato e sezionato molecolarmente in modo più agevole rispetto a quello che è possibile fare negli animali. Per esempio diventa più trattabile il lavoro di ricerca su accensione e spegnimento dei geni nel corso della gametogenesi, in altre parole lo studio del processo di *genomic imprinting*

Ted Horowitz/Corbis

e di conseguenza quello della regolazione fine dell'espressione genica che si attua come meccanismo epigenetico, ovvero con forme di regolazione in cui, come già accennato per la memoria epigenetica, non è la struttura primaria del DNA (la sequenza dei nucleotidi) a variare, ma le sue modificazioni secondarie e terziarie che svolgono una parte importante nel determinare e controllare l'espressione dei geni in tutti i processi fisiologici di sviluppo, senescenza e genesi di tumori.

Il successo sperimentale nella produzione di spermatozoi e uova permetterà anche di approfondire i meccanismi molecolari della divisione meiotica e di approfondire la conoscenza dei fattori che determinano l'entrata nella via differenziativa germinale o somatica nel corso delle prime fasi dello sviluppo. Tecnicamente la sfida cruciale di tutte queste ricerche è proprio costituita dalla capacità di indurre una cellula a entrare in meiosi, mentre la sfida bioetica più formidabile sarà assicurarsi del controllo di qualità nella produzione di queste cellule.

È chiaro che i risultati sperimentali hanno una ricaduta per biomedicina e veterinaria. Tuttavia la possibilità di realizzare compiutamente la produzione di uova e spermatozoi umani da cellule della pelle pone la necessità di una riflessione immediata. Pur ammettendo la difficoltà di questa operazione, la storia della biologia e quella della medicina insegnano che presto la difficoltà sarà superata. Disporremo di spermatozoi e uova in quantità e ottenu-

Figli di chi? Contenitore per uova ed embrioni in attesa di conoscere il proprio futuro. La creazione di gameti artificiali moltiplicherebbe a dismisura i tipi di genitorialità possibile, sollevando profonde questioni etiche.

te da cellule della pelle: su queste cellule sarà possibile effettuare ricerche in dettaglio, che a oggi sono limitate a quei pochi casi in cui le cellule germinali vengono donate alla ricerca.

Le questioni etiche e mediche

Filosofia, sociologia, psicologia e diritto (solo per citarne alcune) sono discipline coinvolte dalle nuove prospettive che nascono da questi dati sperimentali, che creano un cortocircuito nella storia del ciclo vitale dell'essere umano: permettono a cellule somatiche un salto dello spazio anatomico loro assegnato e, fatto ancora più dirompente, un salto del tempo ontogenetico loro assegnato dalla storia naturale del ciclo vitale dell'uomo. Cellule destinate a morire sono traslate in un contesto di immortalità trasformandole in cellule germinali, immortali per definizione perché passano da una generazione all'altra. Inoltre, generando una potenziale autosufficienza riproduttiva, questi dati costringono a interrogarsi su quello che riteniamo possa essere definito umano e post-umano. È bene dunque che la società si interroghi e si esprima sulle opportunità che desideriamo realizzare e su quelle che non riteniamo lecite. Una produzione illimitata di spermatozoi e uova è una formidabile realizzazione di immortalità cellulare.

Va precisato che un esempio, per quanto tragico, di questo tipo è stato compiuto con la creazione delle cellule HeLa, le cellule di Henrietta Lacks, una risorsa inestimabile per la ricerca biomedica e per tante applicazioni commerciali. Di sicuro le applicazioni legate ad animali dotati di tratti genetici di particolare interesse economico non dovrebbero incontrare obiezioni. Ma il mantenimento in laboratorio di cellule iPS di individui pone diverse domande: è lecito mantenerle? Per quanto tempo e per quali applicazioni al di fuori delle possibili terapie per il proprietario? Possono essere disponibili per genitorialità multiple, o magari per la cura di malattie mitocondriali?

Questi sono solo alcuni dei temi, ciascuno con un differente grado di implicazioni biomediche e bioetiche, che è necessario trattare. Alcuni prevalgono per la loro intensità emotiva: teoricamente è possibile derivare spermatozoi e uova dallo stesso individuo e impiegarle in vitro per ottenere un embrione. Spermatozoi da femmine e uova da maschi sono opzioni facilmente censurabili, e un simile scenario trova facilmente un accordo per essere decisamente proibito. Altri tipi di genitorialità, possibili grazie all'impiego di gameti artificiali, appaiono più complessi e meritevoli di un'approfondita discussione.

Meno problematica appare la definizione dell'uso di uova in una campagna tesa all'eliminazione delle malattie mitocondriali. Oggi è necessario sviluppare una cultura del dono di cellule uovo tra amiche con il fine di compiere una chirurgia cellulare basata sul trapianto del nucleo dell'uovo portatore di mitocondri alterati nell'uovo denucleato dotato di mitocondri funzionali, in modo da ricostituire una cellula uovo dotata di mitocondri funzionali.

In un contesto in cui vengono messe in comune cellule uovo derivate da iPS, simili trapianti nucleari sarebbero disponibili per tutte le portatrici di mitocondri alterati (circa 50 gravi malattie sono dovute ai mitocondri). Un prezioso documento di «consenso» sull'uso dei gameti prodotti in coltura è stato elaborato da un consorzio internazionale di scienziati che discute di etica delle cellule staminali: The Hinxton Group. In particolare, nel documento è presentato il quadro di consenso all'interno del dibattito sulle genitorialità uniche, dello stesso sesso e multiple che questa tecnologia permetterà, al di là del trattamento del paziente infertile. Ma è solo l'inizio di una discussione più ampia che i gameti artificiali, o meglio la possibilità che si arrivi a ottenerli, ci costringeranno ad affrontare. ■

PER APPROFONDIRE

Offspring from Oocytes Derived from In Vitro Primordial Germ Cell-Like Cells in Mice. Hayashi K. e altri, in «Science», Vol. 338, pp. 971-975, 16 novembre 2012.

Derivation of Oocytes from Mouse Embryonic Stem Cells. Hübner K. e altri, in «Science», Vol. 300, pp. 1251-1256, 23 maggio 2003.

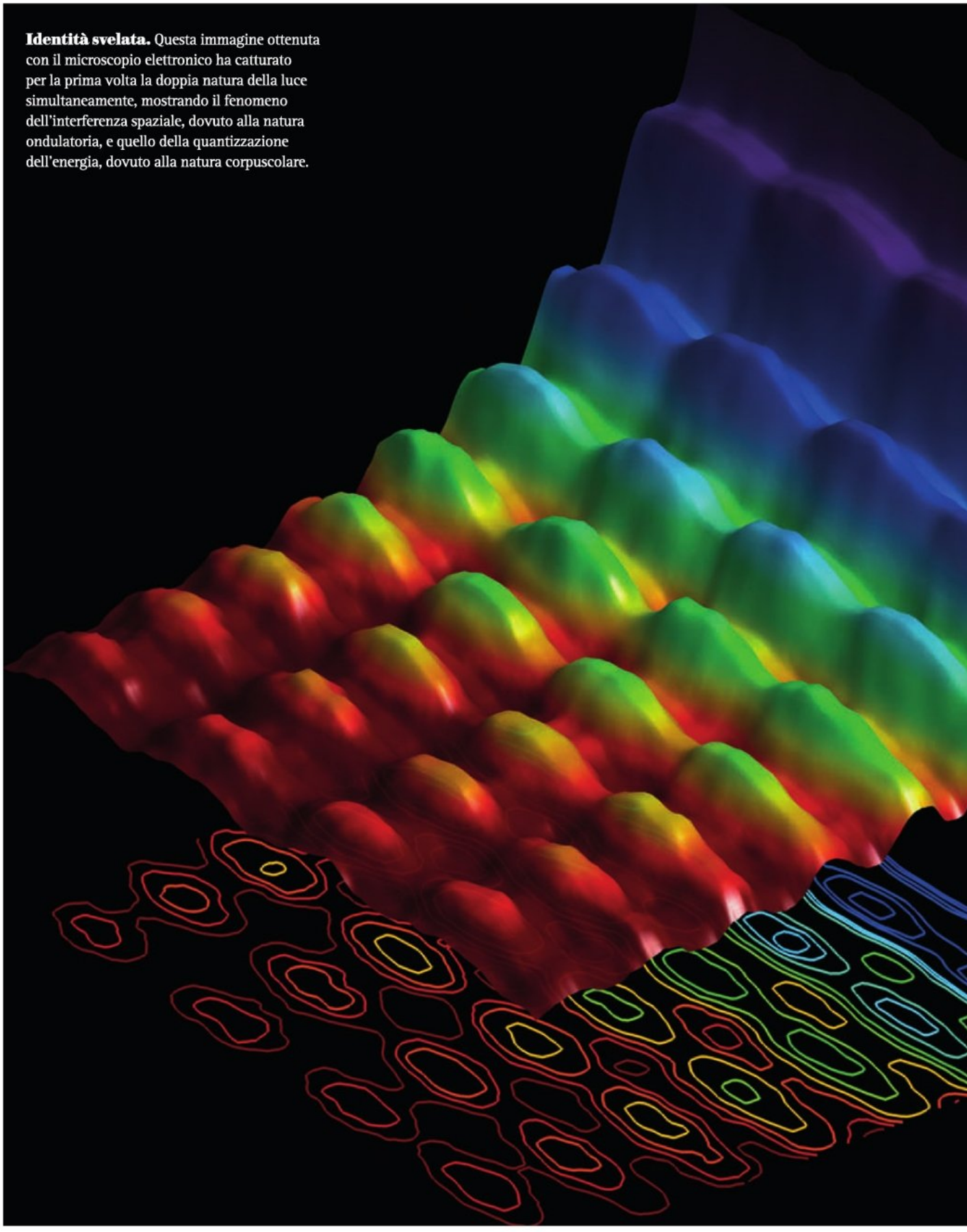
Pluripotent Stem Cell-Derived Gametes: Truth and (Potential) Consequences. Mathews J.H. e altri, in «Cell Stem Cell», Vol. 5, pp. 11-14, 2 luglio 2009.

Staminali. Dai cloni alla medicina rigenerativa. Monti M., Battifoglia E. e Redi C.A., Carocci, Roma, 2015.

Induction of Mouse Germ-Cell Fate by Transcription Factors In Vitro. Nakaki F. e altri, in «Nature», Vol. 501, pp. 222-226, 12 settembre 2013.

Fate of iPSCs Derived from Azoospermic and Fertile Men following Xenotransplantation to Murine Seminiferous Tubules. Ramathal C. e altri, in «Cell Reports», Vol. 7, pp. 1284-1297, 1 maggio 2014.

Il sito web di The Hinxton Group, dove è possibile trovare il documento sull'uso di gameti prodotti in coltura: **http://www.hinxtongroup.org.**



Identità svelata. Questa immagine ottenuta con il microscopio elettronico ha catturato per la prima volta la doppia natura della luce simultaneamente, mostrando il fenomeno dell'interferenza spaziale, dovuto alla natura ondulatoria, e quello della quantizzazione dell'energia, dovuto alla natura corpuscolare.

Cortesia Fabrizio Carbone, EFPL

Immagine di una doppia natura

Un esperimento ha osservato per la prima volta simultaneamente la natura ondulatoria e quella corpuscolare della luce

di Fabrizio Carbone

"Ogni uomo è un misto di buono e cattivo...», il Dr. Jekyll e Mr. Hyde. Ogni fotone è tanto un'onda quanto una particella... «Allora siamo d'accordo? Arrivato in cima a quella collina io scoprirò la mia lanterna. Quando vedrai la luce, tu scoprirai la tua e io misurerò il tempo trascorso tra il mio segnale e la ricezione del tuo.

IN BREVE

Per lungo tempo la natura della radiazione elettromagnetica è stata centro del dibattito tra scienziati: secondo alcuni la luce si comporta come un'onda, secondo altri come un fascio di particelle.
Con l'arrivo della meccanica quantistica è stato stabilito che i fotoni, i vettori della radiazione elettromagnetica, si comportano simultaneamente come onde e particelle, una previsione dimostrata da numerosi esperimenti.
Quegli stessi esperimenti però non erano stati in grado di catturare simultaneamente la doppia natura della luce, risultato ora ottenuto dal gruppo di ricerca diretto dall'autore di questo articolo.
Grazie a tecniche di microscopia elettronica ultraveloce, i ricercatori hanno ricavato un'immagine del campo elettromagnetico in cui hanno mostrato per la prima volta la quantizzazione e l'interferenza del campo simultaneamente.

Fabrizio Carbone è professore di fisica della materia al Politecnico di Losanna, dove dirige il Laboratorio di microscopia e diffusione di elettroni ultraveloce.

Dato che la distanza tra le due colline è nota, un chilometro, ci basterà dividerla per il tempo impiegato dal segnale luminoso e otterremo la velocità della luce».

«Va bene signor Galileo, andiamo», dice l'assistente aspettando nella notte che il maestro si arrampichi sul clive designato e passeggiando qua e là. «Guarda lì! Che belle mele... Quasi quasi me ne mangio due o tre», pensa l'assistente, schivandone una caduta da un ramo e noncurante della gravità del momento.

Un lampo di luce attraversa il cielo e l'assistente corre veloce a scoprire la sua lanterna. Il risultato di Galileo è circa 1200 chilometri all'ora, decisamente troppo poco... Ripetono l'esperimento ottenendo numeri ogni volta molto diversi. L'assistente torna una volta con un cestino di mele, un'altra con funghi... Galileo capisce che il metodo non può funzionare. In effetti la luce, viaggiando a 300.000 chilometri al secondo, percorre un chilometro in circa 3 milionesimi di secondo: troppo poco per essere misurato dagli strumenti dell'epoca, e soprattutto molto più veloce dei riflessi combinati del maestro e del distratto assistente (l'esperimento tuttavia non sarebbe funzionato nemmeno con un assistente solerte).

Nel 1642 muore Galileo Galilei, ma nasce il britannico Isaac Newton, che la mela non schivò, illuminando il moto dei pianeti e la teoria della gravità. Newton inoltre ipotizzò che la luce fosse un fascio di particelle, pur non avendo modo di verificare sperimentalmente la sua ipotesi. Nello stesso periodo, la velocità della luce fu misurata con scarsa precisione, ma in modo consistente, dall'astronomo danese Ole Rømer, che sfruttò l'osservazione delle eclissi solari causate su Giove dai satelliti del pianeta per determinare il tempo necessario alla luce per raggiungere la Terra.

Onde e corpuscoli

Contemporaneo di Newton, l'olandese Christiaan Huygens sviluppò una teoria dei fenomeni luminosi basata sull'idea che la luce non fosse altro che un'onda, come il suono. In breve, per Huygens la luce sarebbe una distorsione periodica di un mezzo che permea lo spazio che ci circonda, in seguito chiamato etere, proprio come le onde modulano la profondità dell'acqua nei mari. Nel 1800 Thomas Young riportò un'osservazione sperimentale che senza ombra di dubbio mostrava la natura ondulatoria della luce. È il famoso esperimento delle due fenditure (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

Un fascio luminoso è inviato contro due fenditure in un piano opaco. La luce che attraversa le fenditure è rilevata a una certa distanza su una lastra fotografica. Se la luce fosse un fascio di particelle, ci si aspetterebbe di trovare due aree distinte esposte alla radiazione luminosa, in corrispondenza delle due aperture. Se le fenditure hanno dimensioni e distanza reciproca paragonabili alla lunghezza d'onda (ovvero il colore) della luce, si osserva una figura di interferenza, proprio come quella che si osserva tra le onde nell'acqua. La prima realizzazione di questo esperimento confermò la teoria di Huygens, portando poi alla descrizione ondulatoria della luce formalizzata nelle cosiddette equazioni di Maxwell, dal nome del britannico James Clerk Maxwell, che le sviluppò intorno al 1870.

Per la verifica della teoria corpuscolare della luce invece si dovette aspettare l'inizio del 1900, quando Albert Einstein, per spiegare l'effetto fotoelettrico, ipotizzò che la luce fosse un fascio di particelle che scambiano energia a pacchetti, chiamati quanti, durante le interazioni con altri corpi.

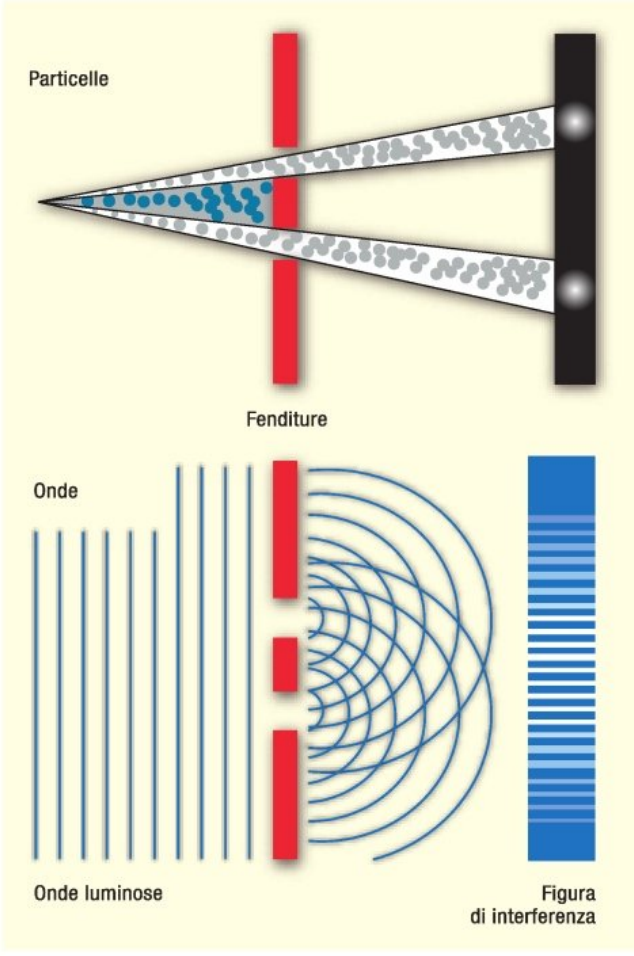
L'effetto fotoelettrico consiste nell'osservazione dell'emissione di elettroni da un metallo in seguito all'irraggiamento con un fascio di luce ultravioletto. All'epoca era difficile spiegare perché l'emissione degli elettroni non dipendesse dall'intensità della radiazione incidente, ma piuttosto dalla frequenza, ovvero dal colore, della stessa (lunghezza d'onda e frequenza sono legate da una relazione di proporzionalità inversa: all'aumentare della prima diminuisce la seconda, e viceversa). L'idea di Einstein fu che ciascun elettrone è legato al metallo da un'attrazione che può essere vinta solo se un pacchetto di energia sufficiente è assorbito in un'unica soluzione. In questa descrizione, la luce è come un fascio di particelle, ciascuna avente un valore discreto di energia proporzionale alla frequenza della luce.

Altre osservazioni sperimentali confermarono questa ipotesi. L'aspetto corpuscolare della luce fu evidenziato per esempio dall'effetto Compton, descritto nel 1923 dallo statunitense Arthur Compton, in cui fotoni di alta energia collidono e subiscono deviazioni dalla traiettoria originaria paragonabili a quelle che avvengono in un urto tra palle da biliardo. L'effetto di corpo nero invece, che descrive la distribuzione in lunghezza d'onda dell'energia irraggiata sotto forma di onde elettromagnetiche da un corpo caldo, richiedette entrambi gli aspetti – ondulatorio e corpuscolare – per la sua descrizione. In retrospettiva, nonostante storicamente l'effetto fotoelettrico segnò l'introduzione dei quanti di luce come entità elementari, negli anni sessanta fu evidenziato che una trattazione classica di questo effetto è in realtà possibile, dimostrando che l'effetto di corpo nero fu il primo a richiedere entrambi i comportamenti ondulatorio e corpuscolare della radiazione elettromagnetica per essere spiegato.

Vale la pena spendere qualche riga su questa curiosità, dal momento che spesso nei libri di scuola l'effetto fotoelettrico è usato come dimostrazione dell'esistenza dei quanti di luce. All'inizio del Novecento la descrizione dei metalli era data dal modello sviluppato dal fisico tedesco Paul Drude, in cui la conduzione elettrica e termica è data da un gas di elettroni liberi confinati in una buca di potenziale, che possiamo immaginare come una microscopica valle circondata da pareti assai elevate. L'emissione di elettroni da parte della radiazione elettromagnetica mostrava un effetto di soglia particolare, cioè non dipendeva dall'ampiezza dell'onda incidente, ma dalla sua frequenza, mostrando uno scalino a una frequenza particolare situata nell'ultravioletto. L'idea di Einstein fu che la luce potesse essere un fascio di particelle, fotoni, con un'energia dipendente dalla frequenza, cioè il colore; ipotizzò inoltre che i singoli elettroni nel metallo potessero assorbire solo l'energia dei singoli fotoni. In questa descrizione, la soglia di emissione appare naturalmente, e rappresenta l'energia necessaria a un fotone per strappare un elettrone alla buca di potenziale che rappresenta il metallo. In analogia, il fotone è come l'energia necessaria a una palla in fondo a un fosso per vincere la forza di gravità.

Oggi sappiamo che un metallo, come tutti i solidi, può essere descritto da un modello in cui le cosiddette bande permesse sono separate in energia e occupate dagli elettroni, un po' come gli orbitali atomici che si studiano a chimica. Usando un modello di questo tipo possiamo ottenere una descrizione dell'effetto foto-

Particelle, onde e interferenza attraverso due fenditure.



elettrico senza ricorrere alla quantizzazione della luce, ma sfruttando la quantizzazione degli elettroni nel solido. Questo è stato dimostrato nel 1968 dai fisici statunitensi Willis Lamb e Marlan O. Scully.

La luce come onda e particella

A questo punto sorge un dubbio: la luce è un fascio di particelle o un'onda come il suono? Secondo la meccanica quantistica, e confermato dall'effetto di corpo nero, la luce deve essere entrambi. L'idea è basata sull'equazione sviluppata negli anni venti dal francese Louis-Victor De Broglie, che associa a ogni oggetto con quantità di moto p una lunghezza d'onda inversamente proporzionale a p. A questa equazione obbediscono anche gli elettroni, che quindi dovrebbero mostrare entrambi i comportamenti.

La verifica di questa congettura arrivò nel 1976 con una variante dell'esperimento delle due fenditure di Young ideata dai fisici italiani Pier Giorgio Merli e Gian Franco Missiroli, recentemente nominato l'esperimento più bello della fisica, poi ripreso da Tonomura nel 1988: al posto di un fascio di luce, un fascio di elettroni attraversa le due fenditure. In questo esperimento ogni singolo elettrone viene visto colpire lo schermo al di là delle fenditure, evidenziandone la natura corpuscolare, ma la sorpresa arriva dopo una lunga osservazione, quando la distribuzione dei punti di arrivo degli elettroni mostra una chiara figura di interferenza. Questo esperimento è stato spiegato ipotizzando che i singoli elettroni attraversino le fenditure seguendo traiettorie tipiche delle particelle, ma allo stesso tempo interagiscono con se stessi generando una figura di interferenza che si manifesta come una distribuzione statistica dei punti di arrivo e che ricalca l'interferenza della luce nell'esperimento di Young.

L'osservazione di questo dualismo negli elettroni è facilitata dalla loro tendenza innata a stare lontani l'uno dall'altro, essendo cariche dello stesso segno e fermioni (particelle a spin semintero che obbediscono al principio di esclusione di Pauli, secondo cui due fermioni della stessa specie non possono trovarsi simultaneamente nello stesso stato quantico). I fotoni invece hanno la tendenza opposta; amano stare in gruppo, dato che sono bosoni (particelle a spin intero che non obbediscono il principio di Pauli). Questa loro socialità si manifesta nel laser, una sorgente di luce in cui molti fotoni condensano in uno stato quantico comune. Di conseguenza, osservare il loro comportamento corpuscolare è stato più difficile, e l'avanzamento fondamentale che lo ha permesso è stata la disponibilità, negli anni ottanta, di sorgenti capaci di emettere un fotone alla volta. Grazie a queste sorgenti, la questione della dualità onda-particella della luce è stata affrontata con gli esperimenti «a scelta ritardata».

Indirizzando un fascio di singoli fotoni lungo un percorso che si divide in due cammini, si può testare se la luce sceglie una delle due strade, come farebbe una pallina nei labirinti di un flipper, o se si divide in due flussi, come farebbe l'acqua nei tubi. Il risultato fu che la luce si comporta come la pallina nel flipper e sceglie uno dei due cammini a disposizione. Il gioco si fa interessante se alla fine dei due cammini si ricombinano i due fasci. Una volta stabilito che i fotoni scelgono un percorso o l'altro, non ci si aspetterebbe di osservare fenomeni di interferenza ricombinando due percorsi. Invece, al variare della lunghezza di uno dei cammini si osserva una frangia di interferenza.

Questa osservazione, come per l'esperimento di Tonomura con gli elettroni, dimostra che la luce è costantemente in una sovrapposizione di onda e particella. La domanda allora fu: è l'esperimento che influenza il comportamento della luce? In altre parole, può la luce fare l'onda se davanti a sé trova un interferometro, o fare la particella se trova un esperimento in cui deve seguire una di due vie? Per rispondere, nel 1978 il fisico statunitense John Archibald Wheeler propose un esperimento «a scelta ritardata» in cui i due rami di un interferometro sono ricombinati solo dopo che la luce ha attraversato la prima divisione in due cammini. In questo modo, una volta fatta la scelta si dovrebbe vedere se la luce mantiene una sovrapposizione di stati o se deve per forza presentarsi alla fine dell'esperimento come un'onda o come una particella. Negli ultimi anni sono state realizzate diverse versioni di questo esperimento, e tutte hanno confermato che la luce mantiene la sua natura duale fino al momento della rilevazione.

Queste misurazioni confermano la base della meccanica quantistica e il principio che vuole due aspetti complementari indistinguibili fino alla loro effettiva osservazione. L'implicazione di questi risultati è il principio di non località, cioè la capacità dei sistemi quantistici, per esempio particelle, di influire su altre particelle distanti in modo istantaneo grazie al fenomeno dell'*entanglement*, che ha conseguenze anche per applicazioni come crittografia quantistica e computer quantistici. Proprio questa era la peculiarità che Einstein non sopportava della meccanica quantistica.

Tutto ciò però soffre di un problema filosofico, dovuto a una visione antropocentrica in cui l'intervento dell'uomo influisce sulle regole fondamentali di natura. Questo non è accettabile, ed

Danilo Sossi su indicazione dell'autore

è stato rettificato da esperimenti sul cosiddetto effetto Hong-Ou-Mandel che mostrano come in realtà la sola possibilità di misurare due aspetti complementari simultaneamente provoca il collasso della funzione d'onda, un'entità matematica che descrive tutte le proprietà di una particella, per esempio la probabilità che si trovi in una determinata posizione.

Dr. Jekyll e Mr. Hyde insieme?

In questo contesto diversi ricercatori si sono domandati fino a che limite fosse possibile misurare due aspetti complementari della luce senza provocare il collasso della funzione d'onda. A questo proposito nel 2011 Sacha Kocsis, dell'Università di Toronto, e collaboratori hanno sviluppato e descritto su «Science» un esperimento a due fenditure con una sorgente di singoli fotoni avente un flusso molto basso. In queste condizioni, gli autori sono riusciti nell'impresa di osservare l'interferenza formata sullo schermo e allo stesso tempo la traiettoria della luce attraverso le fenditure. Senz'altro è la misura che più si è avvicinata all'osservazione di un fenomeno corpuscolare e uno ondulatorio simultaneamente. Tuttavia Milena Davidovic, dell'Università di Belgrado, e Angel Sanz, dell'Instituto de Física Fundamental del Consejo Superior de Investigaciones Científicas di Madrid, hanno in seguito spiegato su «Europhysics News» come non sia immediato associare i singoli fotoni alle traiettorie misurate durante l'esperimento.

La microscopia elettronica ultraveloce offre nuove possibilità per visualizzare le interazioni tra particelle fondamentali

I nostri studi al Politecnico di Losanna hanno un obiettivo simile, ma partono dall'idea che per osservare il comportamento quantistico e quello classico-ondulatorio potrebbe essere vantaggioso concepire un esperimento in cui la luce sia confinata in una regione precisa, per essere osservata tramite la sua interazione con un'altra particella. Questo approccio evita il problema che la luce possa adattare il suo comportamento all'apparato sperimentale, dato che non lo percorre. Ma c'è una complicazione extra: l'interazione con un'altra particella, nel nostro caso l'elettrone. Inoltre, serve confinare la luce in una regione definita dello spazio per un tempo sufficiente alla sua osservazione.

Per ottenere queste condizioni, nel nostro studio abbiamo usato una forma di luce chiamata plasma-polaritone di superficie. Quando gli elettroni su una superficie metallica oscillano in fase, cioè in modo sincrono, possono emettere un campo elettromagnetico guidato dalla superficie stessa. Questo campo ha la proprietà di essere confinato in uno spazio più piccolo della sua lunghezza d'onda, di poter tracciare curve ad angolo strettissimo, essendo guidato dalla geometria della superficie e non da un salto di indice di rifrazione come nelle fibre ottiche. Inoltre condivide con la luce le proprietà quantistiche come numerabilità in singoli fotoni, entanglement, interferenza quantistica e dualità onda-particella, dimostrata in precedenza proprio per plasma-polaritoni confinati su una struttura rettilinea con dimensioni nanometriche (10^{-9} metri).

Per osservare un plasma-polaritone confinato su una nanostruttura abbiamo usato una tecnica sviluppata recentemente e basata sulla microscopia a trasmissione elettronica, o TEM.

Pochi anni fa, la TEM è stata estesa nel dominio del tempo, passando da una macchina fotografica ad altissima risoluzione spaziale capace di osservare singoli atomi, a una telecamera capace di filmare i materiali con una risoluzione temporale dei femtosecondi (10^{-15} secondi) e una risoluzione spaziale dei nanometri. Questa tecnica usa fasci laser per generare un treno di impulsi contenenti ciascuno un solo elettrone e per fornire un'eccitazione con cui innescare una dinamica nel sistema osservato, per esempio un salto di temperatura. Le variazioni indotte dalla luce nel materiale sono poi registrate come immagini, catturando gli impulsi di elettroni che l'hanno attraversato. Variando il ritardo tra gli impulsi di elettroni e la fotoeccitazione, e registrando un'immagine a ogni passo, si può ricostruire un filmato dell'evoluzione del sistema. Una nuova tecnica basata su questo *set-up* è stata sviluppata al California Institute of Technology nel 2009, chiamata Photon-Induced Near-Field Electron Microscopy (PINEM).

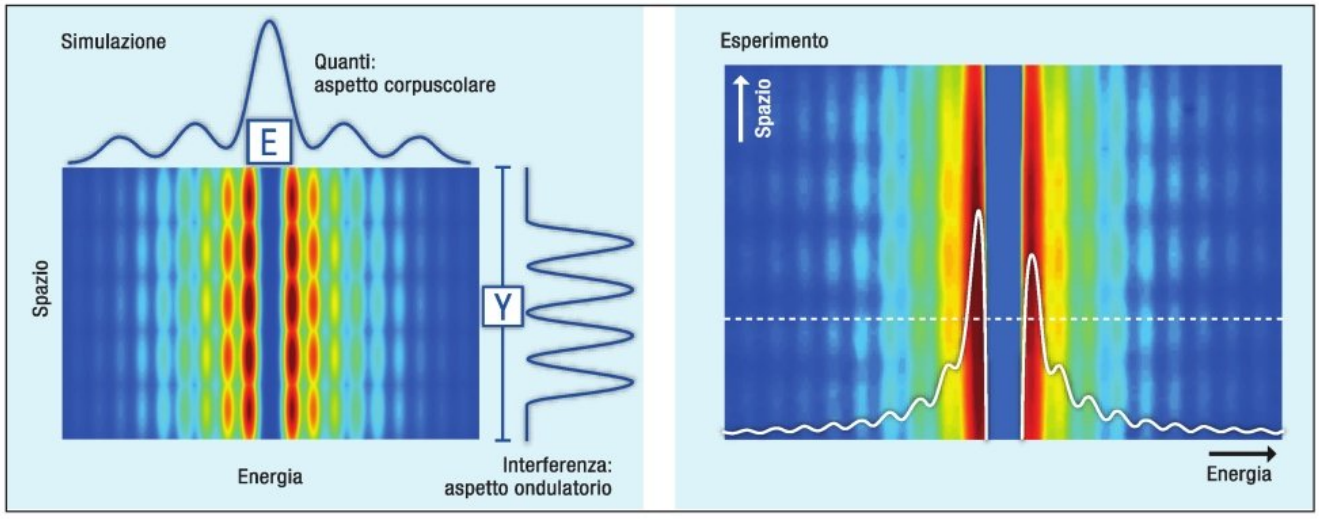
Accoppiando in una nanostruttura un impulso ultracorto di elettroni e uno di luce di durata simile, il campo elettromagnetico indotto dai fotoni intorno alla nanostruttura scambia quanti di energia con gli elettroni, accelerandoli o rallentandoli di una quantità multipla intera dell'energia dei singoli fotoni. Questo fenomeno mostra direttamente la quantizzazione del campo elettromagnetico, e quindi la natura corpuscolare della luce. In una TEM, questa interazione può essere fotografata selezionando gli elettroni che hanno subito questo rallentamento o accelerazione, ottenendo così un'istantanea del campo elettromagnetico stesso.

Di recente nel nostro laboratorio è entrata in funzione una macchina per esperimenti del genere. Grazie a questa tecnica è stato fotografato il campo elettromagnetico sulla superficie di un nanofilo d'argento sospeso su una membrana di grafene, materiale dallo spessore monoatomico composto da un reticolo a celle esagonali in carbonio, mostrando l'onda stazionaria dovuta all'interferenza dei campi sulla nanostruttura, fenomeno legato alla natura ondulatoria della luce. Negli stessi esperimenti può essere registrata anche la distribuzione di velocità degli elettroni, conseguenza della loro interazione con il campo indotto dai fotoni. In assenza di fotoeccitazione si osservano solo elettroni diffusi dal nanofilo e qualche debole rallentamento dovuto agli assorbimenti di energia caratteristici del materiale.

In un intervallo di poche centinaia di femtosecondi dopo la fotoeccitazione, invece, lo spettro mostra una serie di picchi equispaziati di intervalli di energia pari all'energia del fotone incidente. Sono stati visualizzati processi che coinvolgono lo scambio anche di 35 fotoni, evidenziando la natura corpuscolare della luce, descrivibile come un flusso di particele di energia definita (fotoni o quanti di luce). In questo tipo di misure si può registrare la quantizzazione del campo elettromagnetico tramite la spettroscopia e la figura di interferenza facendo un'immagine dello spazio reale. Per questa ragione, queste misure mostrano un effetto quantistico e uno classico in due acquisizioni specifiche separate.

La misura simultanea

Per mostrare questi due aspetti simultaneamente, l'apparato sperimentale è stato modificato in modo da proiettare sulla fotocamera con sensore CCD bidimensionale una coordinata spaziale e la coordinata dell'energia. Dopo la loro interazione con il nanofilo, gli elettroni hanno una distribuzione spaziale e una distribuzione di velocità che codificano le informazioni che ci interessano, cioè quantizzazione e interferenza. Ma per visualizzarle abbiamo solo due dimensioni spaziali: le coordinate del sensore CCD. La soluzione è scegliere una geometria in cui per osservare la figura d'in-



Due caratteri in uno. Le immagini ottenute dall'autore e dai suoi colleghi, una simulazione e la misurazione sperimentale, sono proiettate su una direzione spaziale e sull'energia per evidenziare nella stessa acquisizione i due comportamenti di onda e di particella dei fotoni.

terferenza sia sufficiente una dimensione sola, per esempio un interferometro monodimensionale, mentre l'altra dimensione è usata per registrare la distribuzione di energia.

La distribuzione di velocità degli elettroni, cioè l'energia cinetica, dopo aver interagito con il plasma-polaritone sul nanofilo è proiettata su una coordinata spaziale tramite un sistema di lenti elettromagnetiche che disperdono spazialmente elettroni aventi diverse velocità. Il risultato è che il CCD acquisisce una singola fotografia in cui la quantizzazione del plasma-polaritone e la sua interferenza sul nanofilo sono visibili allo stesso tempo.

Conseguenze e prospettive

È opportuno contestualizzare i risultati e riflettere sulle loro possibili conseguenze. Naturalmente anche la nostra misura è il risultato di un'accumulazione di molti eventi. In questo senso l'immagine acquisisce due comportamenti che possono anche essersi manifestati in istanti diversi durante il periodo dell'acquisizione. In questo senso, nessuna legge della meccanica quantistica è stravolta o violata. Due proprietà complementari di una particella elementare non si possono misurare simultaneamente, e questo resta vero. Tuttavia, se è vero che al di là di questa condizione la teoria non pone limiti di osservabilità, evidenziare un comportamento quantistico e uno classico nello stesso esperimento e nella stessa acquisizione si è dimostrato difficile. Negli esperimenti del 2011 Kocsis è riuscito a mostrare le traiettorie di molti fotoni e al tempo stesso la loro interferenza. Come abbiamo visto, è un risultato eccezionale, ma non potendo associare i singoli fotoni alle singole traiettorie, non è chiaro come queste misure mostrano la doppia natura classica e quantistica della luce.

Negli esperimenti a scelta ritardata la natura corpuscolare e quella ondulatoria della luce sono dimostrate chiaramente, ma sono acquisite in istanti separati e, più importante, sono acquisite da un apparato che cambia durante l'esperimento. Pensiamo che le nostre misure offrano un punto di vista interessante sulla questione perché evidenziano una tipica impronta della meccanica quantistica, la quantizzazione, e un classico fenomeno ondulatorio, come l'interferenza, in un unico esperimento che non varia durante l'acquisizione. In altre parole, l'accumulazione di diversi fotoni è acquisita in una singola foto che registra il loro comportamento nello stesso esperimento. In questo senso, anche se il risultato ottenuto è dovuto al fatto che alcuni fotoni si comportano da onda e altri da particella, come suggerito da Aephraim Steinberg dell'Università di Toronto, co-autore del lavoro di Kocsis, resta importante osservare che davanti allo stesso apparato ci sia questa apparente differenza di comportamento tra particelle indistinguibili. Inoltre la nostra misura evidenzia la quantizzazione, che a nostro avviso è l'impronta più evidente della meccanica quantistica.

Le domande ancora aperte sono molte. Resta da capire se la quantizzazione del campo e la sua interferenza siano in qualche modo collegate dal principio di complementarità, e quindi la loro osservazione sia limitata dal principio di indeterminazione di Heisenberg, oppure se la loro mutua esclusività dipenda dal modo in cui sono misurate. Inoltre, negli esperimenti abbiamo usato plasma-polaritoni di superficie per via della semplicità di confinarli su una nanostruttura. Naturalmente c'è una differenza tra questo campo elettromagnetico e un campo del vuoto. Al momento nuovi esperimenti su sistemi fotonici più complessi del singolo nanofilo sono in corso per superare questo limite e cercare di capire i limiti di osservabilità simultanea di quantizzazione e interferenza al variare dei parametri di incertezza della misura.

In generale le tecniche di microscopia elettronica ultraveloce offrono nuove possibilità per visualizzare le interazioni tra particelle fondamentali come fotoni ed elettroni con alta risoluzione nello spazio reale e nel tempo. Una simile possibilità aprirà nuovi orizzonti per lo studio di fenomeni fondamentali e per applicazioni come la nanofotonica. ■

PER APPROFONDIRE

Simultaneous Observation of the Quantization and the Interference Pattern of A Plasmonic Near-Field. Piazza L., Carbone F. e altri, in «Nature Communications», Vol. 6, articolo n. 6407, 2 marzo 2015.

How Does Light Move? Determining the Flow of Light Without Destroying Interference. Davidovic M.D. e Sanz A.S., in «Europhysics News», Vol. 44, n. 6, pp. 33-36, novembre-dicembre 2013.

Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer. Kocsis S. e altri, in «Science», Vol. 332, n. 6034, pp. 1170-1173, 3 giugno 2011.

Video dell'esperimento della doppia fenditura effettuato nel 1988 da Akira Tonomura: **https://www.youtube.com/watch?v=jv00P5-SMxk.**

Danilo Sossi su indicazione dell'autore (*grafica*); cortesia Carbone (*immagini, 2*)

Illustrazioni di Daniel Stolle

Conquista te stesso, conquisterai il mondo

L'autocontrollo non è solo una virtù puritana, è soprattutto un tratto psicologico chiave che porta al successo nel lavoro e in altre attività quotidiane, e aiuta a superare le difficoltà della vita

di Roy F. Baumeister

La capacità di regolare i nostri impulsi e desideri è indispensabile per riuscire nella vita e nel lavoro con gli altri. Le persone con un buon controllo dei propri processi mentali, emozioni e comportamenti non solo vanno bene a scuola e sul lavoro ma sono anche più sane, più apprezzate dagli altri e hanno più denaro. Godono di migliori relazioni intime e sono considerate più degne di fiducia. Inoltre, è meno probabile che prendano una cattiva strada facendosi arrestare, diventando dipendenti da droghe o sperimentando gravidanze indesiderate. E vivono anche più a lungo. Lo scrittore brasiliano Paulo Coelho ha riassunto questi benefici in un suo romanzo: «Se conquisti te stesso, conquisterai il mondo».

IN BREVE

Trent'anni fa gli psicologi ritenevano, erroneamente, che coltivare l'autostima fosse una panacea per i problemi delle persone e i mali della società.

Il vero punto cruciale invece è risultato l'autocontrollo, non l'autostima. La capacità di regolare impulsi e desideri è la chiave per vivere e lavorare con gli altri.

Le dinamiche dell'autocontrollo sono molto complesse. Se è troppo sfruttata, la forza di volontà può esaurirsi, come se fosse un serbatoio di energia.

Oggi le ricerche sull'autocontrollo si estendono in nuove direzioni, chiarendo anche le radici delle dipendenze e del modo in cui possiamo combatterle.

Roy F. Baumeister è psicologo sociale, i suoi interessi di ricerca vanno dal rifiuto sociale alla sessualità e ai comportamenti aggressivi. Insegna al Dipartimento di psicologia della Florida State University.

Detto in un altro modo, autocontrollo significa saper cambiare se stessi, ed è di gran lunga il modo più critico per adattarsi all'ambiente. Il desiderio di controllare noi stessi e quello che abbiamo intorno, del resto, è profondamente radicato nella nostra psiche, ed è alla base dell'impegno in attività come scienza, politica, affari e arti. Dato che la maggior parte di noi non dispone del sovrano potere di farsi obbedire, e che abbiamo bisogno dell'altrui collaborazione per sopravvivere, saper trattenere aggressività, avidità e impulsi sessuali diventa una necessità.

Il riconoscimento, da parte degli psicologi sociali, dell'importanza dell'autocontrollo riflette un mutamento di prospettive. Trent'anni fa molti di loro, erroneamente, consideravano la coltivazione dell'autostima come una panacea per i problemi personali e i mali della società. Era un errore in buona fede: un'alta autostima è correlata con il successo, quindi era ragionevole aspettarsi che rinforzarla avrebbe migliorato la vita della gente.

Analizzati più da vicino, però, i dati hanno suggerito che l'autostima non conduce di per sé al successo. Più che una causa, è un effetto. Quando i ricercatori hanno seguito studenti per lunghi periodi, hanno trovato che ricevere buoni voti porta in seguito ad avere una stima più alta di sé. Ma un'autostima più alta non dà una pagella migliore. L'autocontrollo, invece, funziona.

Gli esperimenti sull'autocontrollo sono iniziati negli anni sessanta con i pionieristici lavori sulla gratificazione differita effettuati da Walter Mischel, oggi alla Columbia University. In una procedura che in seguito è stata chiamata «test della caramella», Mischel offriva a dei bambini la scelta tra ottenere subito uno dei loro dolcetti preferiti o riceverne due solo se erano disposti ad aspettare un po'. Oltre un decennio dopo la pubblicazione di quei primi esperimenti, Mischel e colleghi rintracciarono quei bambini, ormai diventati adulti, e lo fecero di nuovo quando quei soggetti stavano entrando nella mezz'età. Quelli che più erano riusciti a resistere alla tentazione a quattro anni di età risultarono gli adulti di maggior successo.

Riconoscendo che l'autocontrollo è un requisito per il benessere personale, insieme ad altri colleghi abbiamo iniziato a esplorare i processi psicologici e biologici sottostanti. I risultati indicano che scegliere di non esprimere la rabbia o di rinunciare a una caramella è un atto analogo a prendere energia da una riserva necessaria per arrivare fino al traguardo di una maratona. E che, come ogni altra fonte di energia, si esaurisce nel tempo, e ha bisogno di essere ricostituita. Quello che gli psicologi hanno imparato sull'autocontrollo nei loro ultimi studi potrebbe persino darci nuove idee con cui affrontare i problemi apparentemente intrattabili delle dipendenze da droghe e alcolici.

Allenamento dei muscoli mentali

Da 25 anni studio in laboratorio l'autocontrollo con innumerevoli colleghi di affascinante creatività. Nel tempo ho concluso che l'autocontrollo, che potremmo anche chiamare autodisciplina, o forza di volontà, funziona un po' come un muscolo. In particolare, sembra «stancarsi» con l'esercizio. Centinaia di studi in molti laboratori hanno ormai replicato la scoperta di base per cui, dopo aver esercitato la propria forza di volontà, ne resta meno quando si deve fare un altro sforzo. In uno dei primi studi abbiamo trovato che le persone che facevano appello al proprio autocontrollo per resistere a cioccolato e dolci erano poi meno perseveranti in un difficile esercizio di risoluzione di problemi, e si arrendevano più facilmente di coloro che non avevano già affaticato il «muscolo» della volontà. In altri studi, il tentativo di sopprimere un pensiero proibito – per esempio quando veniva ordinato di non pensare a un orso bianco – rendeva i partecipanti meno capaci di controllare successive reazioni emotive.

Abbiamo coniato l'espressione «esaurimento dell'ego» per indicare lo stato di minore forza di volontà che segue il consumo di energia psichica nell'autocontrollo, che tratti di resistere a una tentazione o di forzarsi a prendere decisioni difficili. L'espressione è un omaggio a Freud, il quale propose che in parte il sé consista di un pozzo d'energia. Oggi le sue vaghe teorie sul funzionamento di questa energia sono per lo più obsolete, ma Freud capì che a spiegare il nostro comportamento è qualche forma di energia psichica. Accantonata per decenni, l'idea è emersa di nuovo quando i nostri esperimenti hanno trovato che l'autocontrollo opera come una specie di muscolo mentale, le cui risorse energetiche si esauriscono con l'uso.

Altre due linee di ricerca hanno esteso l'analogia con i muscoli. Gli esperimenti di Mark Muraven, dell'Università di Albany, hanno mostrato che, una volta esercitata, la forza di volontà non svanisce del tutto. Il corpo, piuttosto, sembra preservare la propria energia: se si presenta una sfida o un'opportunità importante, ha ancora una riserva di autocontrollo a cui attingere. C'è un parallelo con quello che accade con i muscoli veri e propri: quando comincia a stancarsi, un atleta rallenta il ritmo per conservare energia e forza restanti, ma se necessario può ancora fare uno sforzo ben coordinato, attingendo alle riserve per uno sprint finale.

I muscoli si stancano, ma non solo: usati con regolarità diventano più forti. Anche l'autocontrollo si può rafforzare con l'esercizio, come osserviamo quando qualcuno segue un apposito programma per migliorarlo. In vari studi, a un gruppo di volontari veniva dato un periodo di due settimane per modificare il proprio modo di parlare – evitare parolacce, usare frasi complete e dire «yes» e «no» invece di «yeah» e «nope». In un altro programma, ai partecipanti veniva semplicemente chiesto di migliorare la postura, stando seduti o in piedi, ma dritti. Completati questi esercizi, abbiamo valutato l'autocontrollo dei soggetti mediante test di laboratorio, come stringere con la mano una molla il più a lungo possibile, senza alterazioni di sorta nel linguaggio o nella postura. I volontari che avevano svolto gli esercizi precedenti facevano molto meglio di un gruppo di controllo che non aveva dovuto ripulire il proprio linguaggio né stare dritto.

Da questi studi ci è venuto in mente che la nozione ottocentesca di «rafforzamento del carattere» sembra avere una certa validità scientifica. Esercitarsi in maniera regolare nell'autocontrollo sembra far crescere la capacità di attingere a questo tratto di carattere in caso di bisogno.

Nel condurre questi studi ci siamo chiesti se a venire consumata era una vera e propria energia, di natura fisica, o se invece era solo una metafora psicologica. Una risposta è arrivata, senza che la cercassimo, quando il risultato negativo di un esperimento ci ha fatto capire qualcosa di nuovo e utile.

Presumibilmente ci saranno scienziati che nei loro studi procedono di successo in successo, ma io non sono fra questi. In questo caso Matt Gailliot, allora dottorando, si era chiesto se non si

potesse estendere l'osservazione in base a cui, quando si resiste a una tentazione, la forza di volontà si esaurisce. E nel caso opposto? Forse, cedere a una tentazione l'avrebbe rafforzata?

Avevo i miei dubbi, ma ho incoraggiato Gailliot ad approfondire la questione, che fra noi chiamavamo la «teoria del martedì grasso», pensando alla tradizione cristiana di indulgere agli impulsi peccaminosi prima del periodo di penitenza della Quaresima. Prima fiaccavamo l'autocontrollo dei partecipanti chiedendo loro di reprimere il pensiero proibito dell'orso bianco, poi ad alcuni scelti a caso davamo da bere un delizioso frullato, e infine li sottoponevamo tutti a un test di forza di volontà mascherato: dovevano cercare una certa sequenza in una tabella di numeri. La sequenza in realtà non c'era: volevamo vedere per quanto tempo riuscivano a continuare a cercare prima di arrendersi.

I partecipanti che avevano bevuto il frullato perseveravano di più rispetto a quelli che non avevano avuto nulla. Ma l'apparente vittoria per la teoria del martedì grasso fu presto ridimensionata da un'altra prova, con un gruppo di controllo in più. Come l'esperimento già descritto, uno dei gruppi non riceveva nulla prima del test e otteneva, secondo le attese, cattivi risultati; l'altro però beveva un frullato che non sapeva di nulla: invece del gelato era panna diluita con latte, senza dolcificanti; in sostanza, un semplice beverone, per nulla goloso. Purtroppo per la teoria di Gailliot, anche questo gruppo faceva meglio di quelli che non avevano bevuto nulla. All'inizio Gailliot ci è rimasto male, perché l'esperimento pareva smentirlo, ma parlandone ci è venuta un'altra idea:

I cambiamenti che possono verificarsi nel cervello delle persone dipendenti da sostanze non portano alla perdita del controllo delle azioni. Spesso queste persone sono in grado di scegliere se cedere o resistere al craving

se non era il piacere di indulgere alla ghiottoneria a ricostituire la forza di volontà, non potevano essere le calorie?

Abbiamo allora iniziato a leggere materiale sul ruolo del glucosio, lo zucchero che dal flusso sanguigno fornisce energia ai tessuti del corpo, compreso il cervello, sede dell'autocontrollo. Poi, in un'ampia serie di esperimenti, abbiamo ottenuto due risultati a favore di questa ipotesi che hanno retto alla prova del tempo. Uno è che abbiamo visto che quando il livello di glucosio è basso l'autocontrollo ne soffre, spesso in modo netto; cosa che, fra l'altro, dà sostegno alla diffusa idea che un «calo degli zuccheri» può mettere in difficoltà le persone, conclusione che poi è in accordo con gli studi dei nutrizionisti.

L'altro significativo risultato è la conferma che una dose di glucosio somministrata subito prima che l'autocontrollo cominci a cedere aiuta a recuperare la forza di volontà necessaria per andare avanti. Questi risultati suggeriscono che la forza di volontà sia davvero qualcosa di più che una metafora. In più, se l'esercizio dell'autocontrollo fa scendere la forza di volontà e l'energia necessaria a sostenerla, allora l'energia che rimane si può conservare proprio tagliando le ulteriori richieste di autocontrollo.

Un terzo risultato invece non ha retto. In uno studio abbiamo trovato che i livelli di glucosio nel sangue diminuivano nell'esecuzione di un compito che richiedeva autocontrollo. Questo sarebbe stato coerente con l'idea che esercitare la forza di volontà consuma glucosio. Ma non siamo riusciti a replicare affidabilmente questo andamento nei test successivi. Studi di altri laboratori hanno però mostrato che il cervello consuma più glucosio quando si sforza di più, il che dopotutto è sensato, visto che è il cervello a regolare l'autocontrollo.

Una sfida alle nostre idee

Come capita a molte teorie scientifiche, il nostro modello dell'autocontrollo come muscolo si è evoluto con l'arrivo di altri ricercatori. Alcuni hanno cercato di andare più avanti sulla stessa strada, altri di demolire o mettere in discussione il nostro lavoro. I nuovi risultati, e il dibattito che hanno stimolato, hanno contribuito a dare corpo al nostro modo di intendere l'autocontrollo.

Un punto discusso è se davvero il cervello rimane «senza benzina» con cui alimentare la forza di volontà. Come noi, altri ricercatori hanno confermato che l'autocontrollo è indebolito quando il livello del glucosio nel sangue è basso, uno stato fisiologico che influisce sia sul corpo che sul cervello. Alcuni ricercatori hanno però sostenuto che il corpo ha ampie riserve di glucosio a cui attingere se esaurisce il quantitativo assegnato alla forza di volontà.

Oltre allo scettiscismo sulla nostra nozione di esaurimento energetico c'è che il consumo di glucosio da parte del cervello non varia granché, anche se un poco lo fa. Nella preistoria magari qualcuno può aver corso il rischio di restare a corto di glucosio, ma nelle società industriali sono in pochi a doversene preoccupare, di sicuro non i ben nutriti studenti che nei nostri esperimenti davano segni di esaurimento dell'ego o diminuite capacità di autoregolazione.

Tutte queste obiezioni sono state accolte. È possibile però che l'esercizio dell'autocontrollo non debba per forza portare all'esaurimento del glucosio, e che quando il corpo rileva che il glucosio disponibile scarseggia faccia in modo di indirizzare lo zucchero dove è più necessario. In questo caso saremmo ancora nel giusto a pensare che la forza di volontà è una risorsa preziosa, da tutelare. L'idea semplicistica che l'esaurimento dell'ego significhi che il cervello ha finito le riserve di combustibile non è sostenibile, ma sembra probabile che la spinta a risparmiare una risorsa parzialmente esaurita sia forte e pervasiva.

Un'altra critica suggerisce che ogni deficit di forza di volontà possa essere superato ponendo le persone le cui riserve stanno calando in circostanze che li inducono a rafforzare la propria decisione. Alcuni studi hanno mostrato che mettere le persone in posizioni di guida e di potere, o anche solo pagarle per sforzarsi di più, fa sì che continuino a mostrare un buon autocontrollo anche in situazioni in cui la loro energia dovrebbe esser stata consumata da un precedente sforzo di volontà.

Questa ricerca solleva la possibilità che la forza di volontà sia tutta una questione di testa. Non ci sono risorse che si esauriscono; semplicemente, si perde la motivazione a lavorare sodo. Questo può anche voler dire che quando la forza di volontà diminuisce è ancora possibile esercitare in modo efficace l'autocontrollo, se è essenziale farlo. Si pensi al capo che sente responsabilità e pressione del ruolo di guida in una crisi aziendale.

Legata a questa è la critica avanzata da Veronika Job, allora alla Stanford University, e colleghi, fra i quali Carol Dweck, l'originaria proponente dell'innovativa teoria da cui i ricercatori sono partiti: la loro ipotesi è che la forza di volontà è illimitata e una

persona con sufficienti motivazioni può semplicemente continuare ad andare avanti. A loro avviso, l'idea dell'esaurimento dell'ego è un'illusione basata su una falsa credenza.

La nostra teoria di allocazione dell'energia non è in disaccordo con l'idea per cui le persone possono attingere, per un certo tempo, a risorse di riserva. Una volta consumata un po' di forza di volontà, il corpo può cercare di preservare quella che resta, ma può ancora raccoglierla e fare bene ciò che deve se la situazione lo richiede. Gli atleti stanchi gestiscono le energie per spenderle su punti che possono vincere e nei momenti decisivi. Le persone il cui ego è esaurito fanno lo stesso con la forza di volontà.

Nei nostri studi abbiamo visto che le persone convinte che la forza di volontà non abbia limiti ricorrono alle riserve esistenti per aumentare i livelli di glucosio nel sangue quando altrimenti lo zucchero avrebbe dovuto essere esaurito. Quando la si esamina più da vicino, però, la storia si fa un po' più complicata.

Un test cruciale c'è stato quando l'esaurimento non era lieve ma i partecipanti continuavano invece a esercitare il proprio autocontrollo fino a un grado di affaticamento tanto serio da non poter essere più ignorato. Kathleen Vohs, dell'Università del Minnesota, Sarah Ainsworth, mia dottoranda alla Florida State University, e altri hanno mostrato che incentivi in denaro o responsabilità dirigenziali permettono di mantenere l'autocontrollo anche quando la forza di volontà è esaurita. Ma questi studi hanno poi dato inizio a un'estenuante serie di esercizi, in cui si vedeva che l'esaurimento peggiorava, e l'autocontrollo cominciava a scendere. E un aspetto essenziale è che le persone che erano state indotte a credere che la forza di volontà non avesse limiti in realtà facevano peggio degli altri. All'inizio l'idea aiutava, ma a lungo andare era controproducente.

A quanto pare, l'autocontrollo può essere mantenuto, ma non indefinitamente. Dopotutto, non è che l'idea per cui la forza di volontà è illimitata, o una promozione a dirigente, valga come una dose di glucosio in più. Semplicemente, si è più disponibili a consumare le proprie riserve. Alla fine, però, si tocca il limite. Illudersi che l'autocontrollo sia infinito equivale a credere che un conto in banca abbia fondi illimitati. All'inizio forse si può spendere senza pensieri, ma alla fine si rischia di restare senza soldi.

La forza di volontà libera dalle dipendenze?

Studi recenti hanno scoperto nuove aree in cui l'autocontrollo ha un ruolo centrale. Alcune di queste scoperte rovesciano le idee prevalenti su varie forme di dipendenza. Un'idea diffusa è che il *craving* per droga, alcolici e sigarette si impadronisca della vita della persona dipendente da sostanze, e che smettere sia impossibile senza un trattamento medico o almeno un forte impegno pianificato. Alan I. Leshner, già direttore del National Institute on Drug Abuse ed ex amministratore delegato dell'American Association for the Advancement of Science, ha dichiarato che la dipendenza è una «malattia del cervello». A suo avviso, un assuntore può inalare o iniettarsi una sostanza volontariamente, ma a un certo punto nel cervello scatta un interruttore. L'abuso della sostanza diventa involontario, e la compulsione rimane anche quando una persona desidera smettere. Forza di volontà e intenzione scompaiono una volta che la dipendenza abbia preso piede.

Nuovi risultati indicano però che i cambiamenti che possono verificarsi nel cervello dei dipendenti da sostanze non portano alla perdita del controllo delle proprie azioni; spesso queste persone hanno la capacità di scegliere se cedere o resistere al craving.

Più specificamente, la dipendenza non porta con sé cambiamenti in un'area cerebrale essenziale per l'autocontrollo che governa il movimento: la corteccia motoria, dove hanno inizio le nostre azioni, dal lavarsi i denti all'allungare la mano verso una pipa di crack. Con la crescita della dipendenza, la decisione di prendere la pipa non diventa improvvisamente involontaria. Si verifica, invece, un lento e insidioso slittamento del desiderio. L'eroina, o la sigaretta, evoca sensazioni piacevoli che poi si sviluppano in un gran desiderio per la sostanza stessa.

La persona dipendente riesce a resistere per un po', ma a un certo punto cede e deve tornare a reprimere la sua voglia. Ma il desiderio non è sempre irresistibile. In uno studio di Wilhelm Hofmann, oggi all'Università di Colonia, persone contattate a caso nel corso della settimana dovevano riferire su tutti i desideri che venivano loro in mente. La voglia di una sigaretta, o di una bevanda alcolica, era classificata come più debole di tutte le altre.

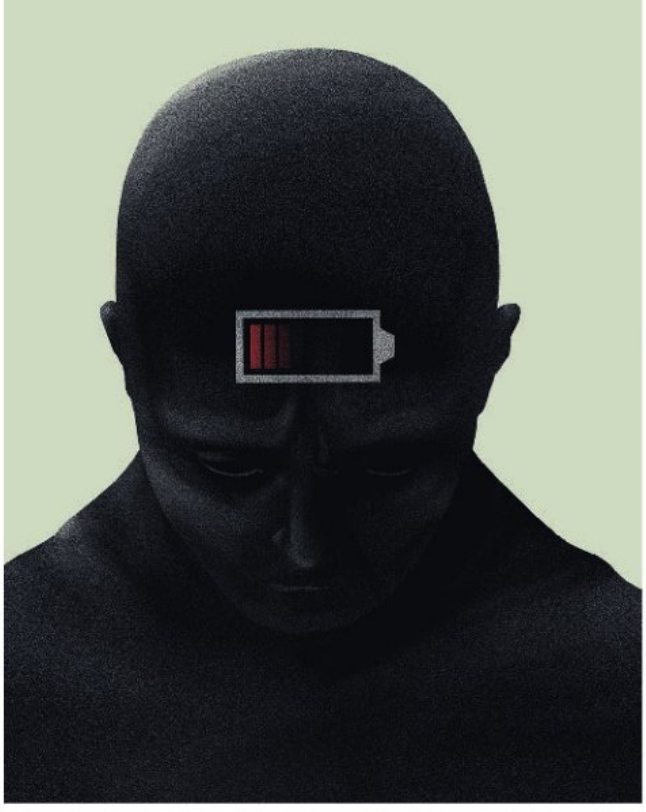
Questo e altri risultati indicano che la persona dipendente sperimenta un flusso intermittente di impulsi relativamente deboli. Quello che rende difficile smettere è che gli impulsi sono molto frequenti; ma queste persone non sono vittime di una mitica e insormontabile difficoltà di resistere a un desiderio travolgente.

La controversia sulla capacità di autocontrollo o meno delle persone dipendenti da sostanze resterà probabilmente aperta. Da politici e operatori del campo vengono argomenti a sostegno del mito per cui alla base della dipendenza ci sarebbero spinte incontrollabili. Molte delle stesse persone dipendenti preferiscono queste idee perché le esonerano dalla responsabilità personale. Spesso le diffondono anche i mezzi di comunicazione, forse perché attori e altre celebrità che sviluppano dipendenze devono mantenere affetto e fedeltà dei fan, e questo è più facile se possono attribuire il proprio uso di droghe a demoni esterni e spinte incontrollabili. I fan potrebbero non essere così indulgenti se le celebrità ammettessero, semplicemente, che prendere droghe a loro piace.

La nostra capacità di controllare emozioni e desideri permette di gestire, nel bene o nel male, l'incessante sfida di adattarci al mondo attorno a noi

Gli psicologi hanno opinioni diverse sul fatto che la forza di volontà possa essere o meno un efficace rimedio contro la dipendenza. Un sondaggio condotto nel Regno Unito ha trovato che gli operatori che lavoravano da volontari tendevano a pensare che i tossicodipendenti sono in grado di regolare i propri impulsi. Quelli pagati per il proprio lavoro preferivano invece pensare che il tossicodipendente è impotente e incapace di arrivare a stare meglio senza l'aiuto degli esperti. Non si intende con questo suggerire che gli operatori sanitari siano interessati solo ai soldi. Ma quando emerge una controversia gli incentivi finanziari spingono probabilmente un po' tutti a sostenere le prove che corrispondono ai propri interessi e a trovare i punti deboli degli argomenti contrari.

Un altro mito in materia di dipendenze è che il craving si faccia più acuto solo quando si sta abbandonando una sostanza che dà dipendenza. Un brillante studio di Michael Sayette, dell'Università di Pittsburgh, ha dimostrato che i fumatori pensavano che il proprio desiderio sarebbe cresciuto nel tempo specialmente se si diceva loro che non potevano fumare.



Lo studio ha mostrato anche che queste convinzioni erano sbagliate. Alcuni partecipanti dovevano astenersi dal fumo e riferire del proprio desiderio di fumare. Invece di salire costantemente, il desiderio di una sigaretta cresceva e calava in modo imprevedibile. Altri studi hanno trovato che, quando un fumatore smette, il desiderio di fumare cala subito, e per la maggior parte del tempo è tenuto a bada. Se c'è una ricaduta, come spesso accade, non è per una spinta irresistibile alla sigaretta, ma per una voglia relativamente debole in un momento di minimo della forza di volontà.

Per drogarsi bisogna volerlo

L'idea che uscire da una dipendenza richieda forza di volontà sembra sensata alla maggior parte delle persone. Fino a poco tempo fa, però, pochi hanno pensato al fatto che anche per iniziare a drogarsi e continuare ci vuole il controllo di sé. Alla maggior parte di noi birra e sigarette al primo assaggio non piacciono. E anche gli avvertimenti delle autorità sanitarie sui pericoli possono dissuaderci dall'iniziare. In realtà, per superare queste influenze contrarie e fare i primi passi verso la dipendenza può volerci una bella forza di volontà. Per mantenere una dipendenza, poi, bisogna dedicare una gran quantità di energia ad assicurarsi che non interferisca troppo con lavoro, famiglia e rapporti personali.

Pensiamo al fumo. Oggi le restrizioni sono tante che un fumatore che vuole farsi una sigaretta deve concepire e realizzare piani tutt'altro che semplici. Quando l'università in cui lavoravo tempo fa ha introdotto regole che vietavano ai professori di fumare nel proprio ufficio, una collega ha fatto sforzi eroici per adeguarsi. Non dimenticherò facilmente la scena di lei che esce dall'edificio verso una tempesta di neve, con il figlioletto in braccio, per potersi accendere una sigaretta.

Di autocontrollo ha dovuto metterne insieme parecchio. Primo, organizzarsi per una pausa tra lezioni, appuntamenti e riunioni, e capire dove andare per non violare le regole del campus. Poi coprirsi bene contro il freddo, lei e il bambino. E non dimenticare pacchetto di sigarette e accendino prima di affrontare la tempesta.

Uno studio sul fumo condotto nei Paesi Bassi da Michael Daly, dell'Università di Stirling, conferma in una certa misura l'osservazione aneddotica che mantenere una dipendenza richiede un buon autocontrollo. Daly ha trovato che il bando del fumo dai posti di lavoro introdotto nei Paesi Bassi nel 2004 aveva ridotto le sigarette, ma con un paio di precisazioni. La riduzione del fumo era avvenuta soprattutto tra persone che, in un'apposita indagine, si ritenevano poco disciplinate, e questo gruppo era tornato alle precedenti abitudini nel giro di qualche anno. Sulle persone con alti punteggi di autodisciplina non sembravano esserci stati effetti.

Gli scienziati a favore dell'idea che la dipendenza è legata a scarso autocontrollo avrebbero forse potuto attendersi un risultato iniziale diverso: le persone con maggior autocontrollo alterano il proprio comportamento in risposta al bando, mentre quelle meno brave ad autoregolarsi continuano a fumare. E potrebbero spiegare il fatto che abbiamo trovato l'opposto pensando che le persone con poco autocontrollo avevano avuto bisogno della forte spinta della legge per superare l'ostacolo iniziale, e interpretare la successiva ricaduta suggerendo che nel tempo la minaccia della legge si fosse in qualche modo attenuata.

Ma la spiegazione sembra legata al fatto che i fumatori avevano bisogno di attingere alle proprie riserve di forza di volontà per mantenere il vizio. Per anni avevano fumato alla scrivania. Di colpo non si poteva più. Per continuare a fumare dopo il bando, i fumatori avevano dovuto adottare adattamenti elaborati. Ogni pausa doveva essere organizzata, programmando dove e quando.

Quelli che avevano un buon autocontrollo erano in grado di gestire queste esigenze. Quelli invece con meno autocontrollo hanno ceduto, e per un po' hanno smesso. Col tempo, però, hanno notato le strategie messe in atto dai fumatori a forte autocontrollo: hanno visto per esempio che i colleghi più ostinati andavano in un angolo del parco, e hanno copiato le strategie.

Vari studi hanno mostrato che le persone dipendenti sembrano in grado di pianificare ed eseguire intricate strategie per mantenere la dipendenza da eroina o sigarette, che ricercatori, clinici e persino gli stessi assuntori ritenevano un tempo immodificabile. Questi risultati offrono un nuovo modo di considerare le dipendenze. È possibile che questi gruppi possano reindirizzare la stessa ostinazione a procurarsi una bevuta o una dose per liberarsi dalla dipendenza. Ma l'idea solleva anche nuove domande.

Un terapeuta può trovare difficoltà a convincere un assuntore abituale che ha preso una strada sbagliata, se l'assuntore non vede nulla di permanentemente dannoso nel farsi qualche bicchiere o nel buttar giù qualche pillola mentre però continua ad assolvere alle sue responsabilità in casa e al lavoro. Questa migliore conoscenza della natura delle dipendenze ci dà un'ulteriore dimostrazione della misura in cui l'autocontrollo può influire sui nostri comportamenti in numerosi modi e di come può anche, per quanto controintuitivo, farci perseverare in abitudini autodistruttive. Questo dimostra una volta di più che la nostra capacità di controllare emozioni e desideri permette di gestire, nel bene o nel male, l'incessante sfida di adattarci al mondo attorno a noi. ■

PER APPROFONDIRE

The Strength Model of Self Control. Baumeister R.F. e altri, in «Current Directions in Psychological Science», Vol. 16, n. 6, pp. 351-355, dicembre 2007.

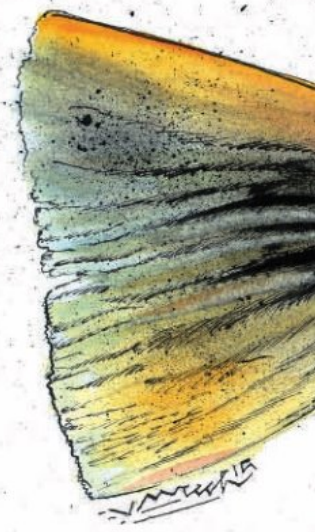
Willpower: Rediscovering the Greatest Human Strength. Baumeister R.F. e Tierney J., Penguin Press, New York, 2011.

Uses of Self-Restraint to Facilitate and Restrain Addictive Behavior. Baumeister R.F. e Vonasch A.J., in «Addictive Behaviors», Vol. 44, pp. 3-8, maggio 2015.

Il mito dell'autostima. Baumeister R.F. , Campbell J.D., Krueger J.I. e Vohs K.D., in «Le Scienze» n. 439, marzo 2005.

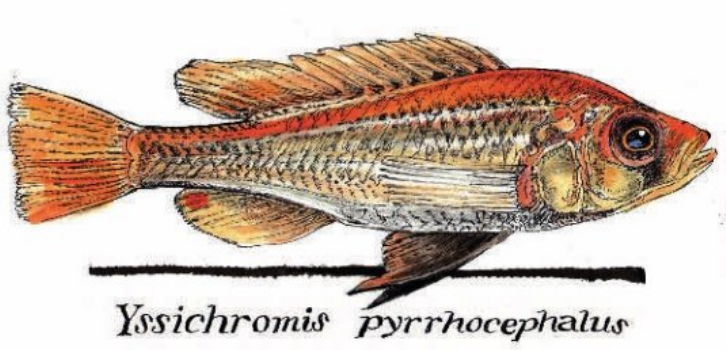
SCIENZE DELLA VITA

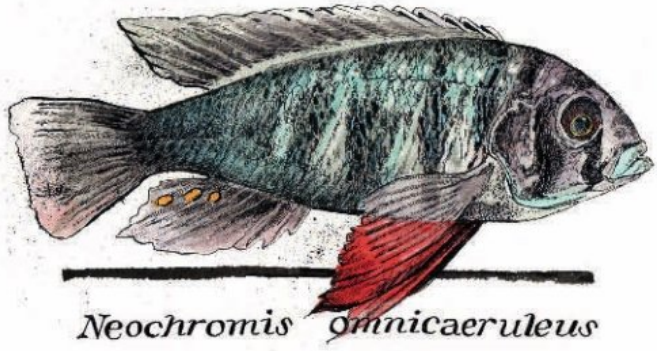
EVOLUZIONE ESTREMA

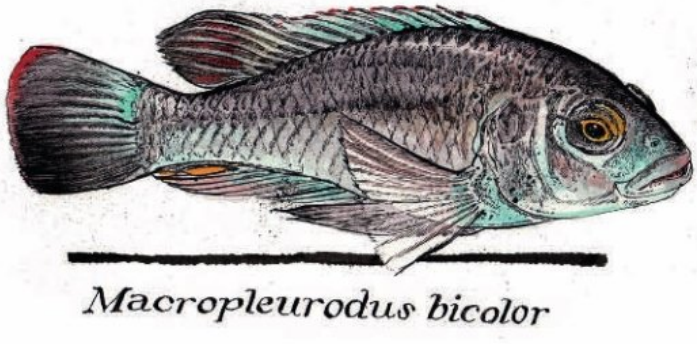


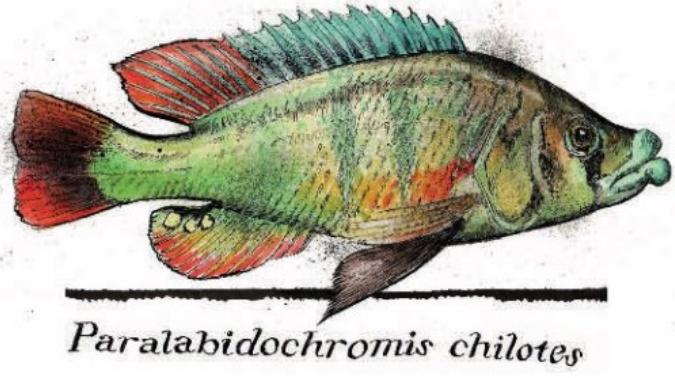
I ciclidi sono stati protagonisti di uno stupefacente processo di speciazione. Nuovi studi rivelano le caratteristiche dei loro genomi che hanno creato le premesse per questa diversificazione

di Axel Meyer



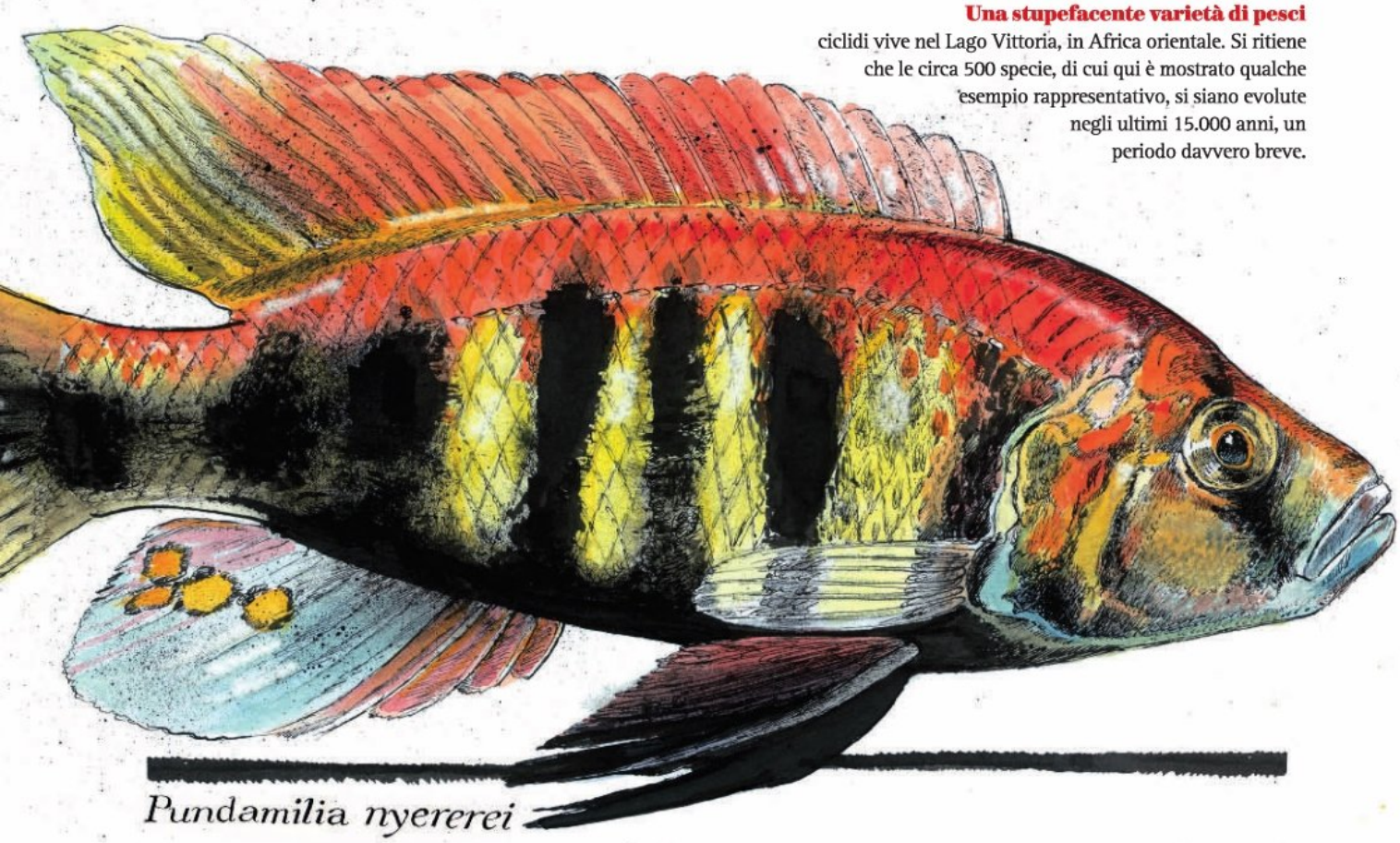




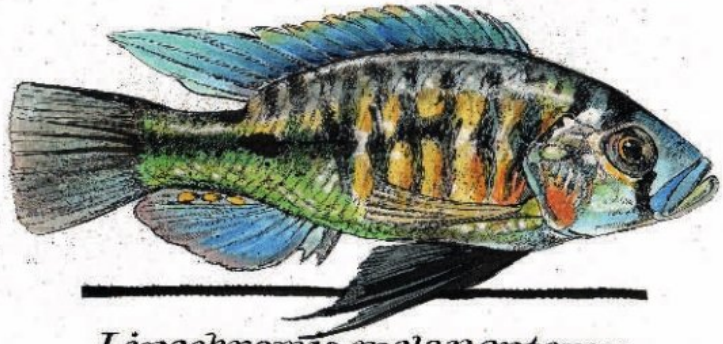


Illustrazioni di Jack Unruh; iStockphoto (*puntina e cartellino*)

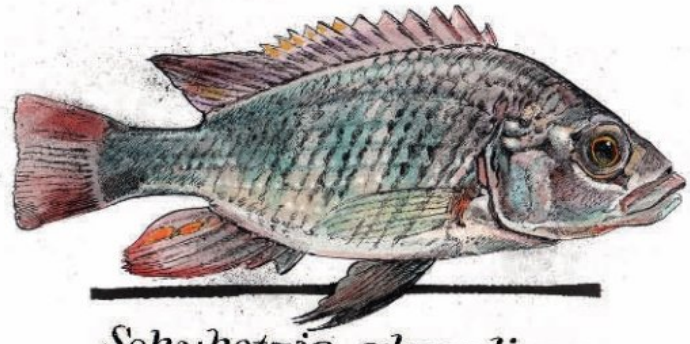
Una stupefacente varietà di pesci
ciclidi vive nel Lago Vittoria, in Africa orientale. Si ritiene che le circa 500 specie, di cui qui è mostrato qualche esempio rappresentativo, si siano evolute negli ultimi 15.000 anni, un periodo davvero breve.



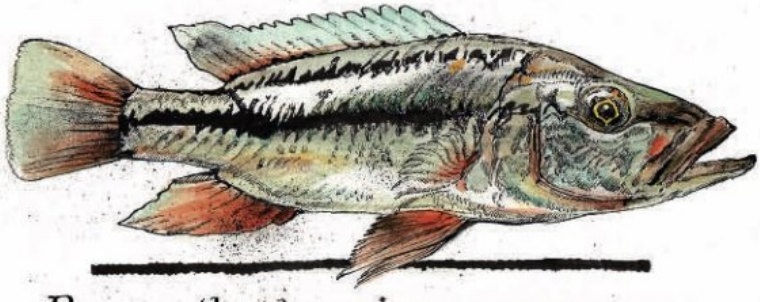
Pundamilia nyererei



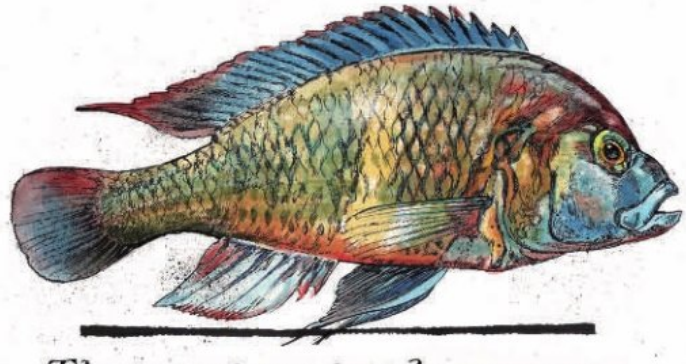
Lipochromis melanopterus



Schubotzia eduardiana



Prognathochromis macrognathus



Thoracochromis pharyngalis

Axel Meyer insegna zoologia e biologia evoluzionistica all'Università di Costanza, in Germania. Le sue ricerche si concentrano sulle origini degli adattamenti e della biodiversità sia a livello molecolare che di organismo. È stato fra i primi a usare le sequenze di DNA per studiare le differenze tra le specie e i processi di speciazione.

Il Lago Vittoria, in Africa, ospita uno dei massimi esperimenti dell'evoluzione. Nelle sue acque, da quella che all'inizio era una singola linea di discendenza di pesci appartenenti alla famiglia dei ciclidi sono poi emerse una strepitosa diversità di forme. Come i famosi fringuelli di Darwin, fra i quali si è evoluta una vasta gamma di forme e dimensioni del becco per sfruttare le diverse fonti di cibo disponibili nelle Isole Galapágos, questi ciclidi rappresentano un esempio da manuale di quella che i biologi chiamano radiazione adattativa, il fenomeno per cui una linea di discendenza genera numerose specie che si evolvono specializzandosi in una variegata serie di ruoli ecologici.

Ma i ciclidi del Lago Vittoria superano di gran lunga i fringuelli di Darwin per l'incredibile rapidità con cui si sono diversificati: le oltre 500 specie che oggi vivono nel lago, e solo in quel lago, si sono tutte evolute negli ultimi 15.000 anni, un batter d'occhio in termini geologici, rispetto alle 14 specie di fringuelli evolutesi in vari milioni di anni.

Il Lago Vittoria non è il solo posto in cui i ciclidi sono di casa. Altri laghi di acqua dolce e fiumi tropicali dell'Africa, nonché le Americhe e la punta meridionale del Subcontinente indiano, ospitano propri ciclidi. Nel complesso si stima che la famiglia comprenda oltre 2500 specie. Alcune, come le tilapie, sono sfruttate a scopo alimentare, e sono tra le più importanti specie di acquacoltura nel mondo. Molte, come l'astronoto e il pesce angelo, sono amate dagli appassionati degli acquari perché sono molto belle e con interessanti comportamenti parentali e di corteggiamento. Molte specie aspettano ancora una descrizione formale. Nei laghi i ciclidi convivono con altre famiglie di pesci, ma sono gli unici ad aver conosciuto una speciazione così vasta e rapida. Anzi, nessun altro gruppo di vertebrati può rivaleggiare con i ciclidi per numero di specie e varietà di forme, colori e comportamenti. Allo stesso tempo, però, spesso fra questi pesci l'evoluzione si è ripetuta: svariati adattamenti si sono prodotti in parallelo in diverse e separate linee di discendenza dei ciclidi, e questo è curioso.

Come altri scienziati, da tempo mi stupisco della molteplicità delle forme dei ciclidi, e mi chiedo quali fattori abbiano permesso a questo gruppo di differenziarsi in maniera tanto straordinaria. I recenti progressi della tecnologia di sequenziamento dei genomi ci hanno permesso di esaminare il loro DNA alla ricerca di indizi sulle cause di questa esuberanza evolutiva. Non abbiamo ancora risolto il rompicapo della diversità dei ciclidi, tutt'altro. Ma abbiamo trovato caratteristiche speciali dei genomi dei ciclidi che potrebbero aver permesso a questi pesci di diversificarsi a grande velocità e allo stesso tempo però di produrre certi tratti più volte. Esplorando le basi genetiche dello straordinario successo dei ciclidi, apriamo uno spiraglio da cui osservare gli ingranaggi stessi dell'evoluzione e quello che vediamo servirà ai ricercatori per ricostruire le origini di specie di ogni tipo.

Diversi ma sempre gli stessi

Per farci un'idea più chiara della stupefacente diversità dei ciclidi, consideriamo le forme del Lago Vittoria e quelle degli altri due laghi in cui si sono verificate le principali radiazioni evolutive dei ciclidi dell'Africa orientale: il Lago Malawi, con forse 800-1000 specie, e il Lago Tanganica, che conta circa 250 specie di ciclidi appartenenti a linee di discendenza più antiche, una delle quali ha poi colonizzato gli altri due laghi, più giovani, generando le rispettive radiazioni. Questi pesci esibiscono i colori dell'arcobaleno e dimensioni che vanno da un paio di centimetri a un metro, e hanno evoluto adattamenti per sfruttare ogni concepibile fonte di cibo del proprio ambiente.

Alcuni hanno denti piatti, come gli incisivi umani, con cui raschiano le alghe che crescono sulle superfici rocciose; gli insettivori hanno denti lunghi e appuntiti che penetrano nelle fessure delle rocce; i predatori che tendono agguati alle prede hanno enormi mascelle estensibili con cui risucchiarle in bocca in pochi millisecondi. Queste sono solo alcune delle più ampie categorie di specializzazione. Fra i ciclidi che raschiano le alghe, per esempio, alcuni si sono adattati a cercare cibo nelle zone in cui le onde si frangono, altri esclusivamente su un particolare gruppo di scogli e non su altri, altri ancora a mangiare solo a un certo angolo con la roccia o solo certi tipi di alghe.

Eppure, con tutta la varietà osservata nei ciclidi dell'Africa orientale, alcuni tratti altamente specializzati si sono evoluti più volte. Per esempio, parecchie specie di tutti e tre i laghi si nutrono quasi solo delle squame di altri pesci. Tutte hanno sviluppato gli stessi particolari denti a rastrello per restare attaccate alle squa-

IN BREVE

Con oltre 2500 specie, i pesci ciclidi sono la famiglia di vertebrati più diversificata conosciuta.
Il recente sequenziamento di numerosi genomi di ciclidi ha iniziato a fare luce sulla stupefacente diversificazione di questi pesci.
I genomi dei ciclidi mostrano diverse caratteristiche che potrebbero aver accelerato l'evoluzione del gruppo.
Altri tratti genomici potrebbero spiegare la tendenza per cui nei ciclidi si sono evoluti più volte, in modo indipendente, gli stessi adattamenti.

Un segreto per il successo: un altro paio di mascelle

Tutti i ciclidi hanno le usuali mascelle della bocca, ma hanno anche un secondo paio di mascelle, che si trovano nella gola. Il cibo che mangiano è sminuzzato da entrambe le coppie di mascelle. Questa duplicazione lascia le mascelle della bocca libere di evolversi per adattarsi a particolari tipi di alimenti, dalle alghe alle scaglie di altri pesci, senza il rischio che la specie diventi troppo dipendente da una particolare fonte di cibo che potrebbe esaurirsi.

me delle vittime. Ma i loro denti non sono l'unico adattamento a questa dieta. Le mascelle si sono evolute per essere asimmetriche, aprendosi a destra o a sinistra ma non da entrambe le parti, per meglio strappare le squame di uno dei due lati del bersaglio. I ciclidi orientati a «sinistra» grattano via le squame dal lato destro delle vittime, quelli orientati a «destra» grattano dal sinistro. (La selezione naturale ha mantenuto l'equilibrio tra le due forme: circa la metà dei mangiatori di squame che ho preso in vari punti del Lago Tanganica erano orientati a destra, gli altri sinistra.) I mangiatori di squame hanno un insieme particolare di adattamenti al proprio stile di vita, ma in qualche modo gli stessi tratti sono emersi in almeno tre occasioni separate nei tre laghi dell'Africa orientale.

Un altro particolare adattamento emerso più volte in modo indipendente sono labbra più grandi in pesci le cui prede si trovano nelle fessure delle rocce. Con i colleghi ho mostrato che queste labbra «alla Angelina Jolie» agiscono come elementi sigillanti che aiutano i pesci a succhiare le prede dalle fessure in cui si nascondono (i ciclidi senza questo tipo di labbra non possono arrivare con efficienza alle prede nelle fessure più strette). Il fatto notevole è che nelle tre radiazioni africane, e in due del Nuovo Mondo, ci sono specie che hanno sviluppato in parallelo questo tratto.

Analogamente alcuni specifici schemi di colorazione si sono evoluti in modo indipendente in diverse separate linee di discendenza. Mentre un'ampia maggioranza dei ciclidi ha strisce verticali scure che presumibilmente servono per mimetizzarsi e fuggire ai predatori, in ognuno dei tre laghi dell'Africa orientale c'è una manciata di specie in cui si sono evolute anche strisce orizzontali. Questo schema, così diverso, si trova soprattutto in specie di acqua alta, tendenzialmente rapide nel nuoto e predatrici, forse perché le strisce orizzontali aiutano a oscurarne la forma del corpo alle prede.

Motori di innovazione

I due temi apparentemente contraddittori della storia evolutiva dei ciclidi, estrema diversificazione e ripetuta evoluzione parallela di adattamenti molto specializzati, sollevano diverse questioni importanti. Una inizia da specie che hanno abitudini alimentari specializzate, con l'osservazione che di solito adattarsi a una dieta ristretta significa che se qualcosa va male nella fonte di cibo essenziale, lo specialista è nei guai. Come hanno fatto i ciclidi a evitare questa trappola? Una risposta sembra trovarsi in una strana caratteristica anatomica che solo i ciclidi hanno tra i pesci di acqua dolce. Tutti i ciclidi hanno il solito paio di mascelle della bocca e un secondo paio di mascelle nella gola, come il mostro del film *Alien*. Ogni tipo di cibo che mangiano è afferrato e trasformato prima dalle mascelle della bocca e poi dalle mascelle faringee. Come i risultato, i ciclidi possono avere mascelle della bocca adattate a un certo tipo di cibo e mascelle faringee in grado di masticare altri tipi. In questo modo innovativo molti ciclidi sono sfuggiti all'opposizione tra generalisti e specialisti. In altre parole possono evolvere una specializzazione restando però allo stesso tempo generalisti in caso di esaurimento del loro alimento preferito o di opzioni migliori.

Le mascelle faringee spiegano come i ciclidi abbiano potuto mitigare i rischi della specializzazione, ma qual è stata la fonte di tutte le novità evolutive in questi pesci? Quali sono stati i fattori che hanno spinto i geni che codificano per i loro tratti a cambiare così rapidamente, e in che modo gli stessi adattamenti hanno continuato a comparire in linee di discendenza separate? Di recente, grazie all'avvento di metodi di sequenziamento genomico rapido, con i miei colleghi – un consorzio di oltre 70 ricercatori in laboratori di tutto il mondo, diretto dal Broad Institute di Cambridge, in Massachusetts – abbiamo fatto importanti passi avanti nel rispondere a queste domande e risolvere l'enigma dello stupefacente successo della famiglia dei ciclidi. L'anno scorso per la prima volta abbiamo sequenziato il DNA dei genomi di alcuni ciclidi. Abbiamo ottenuto la sequenza completa di cinque specie africane e sequenze parziali di 60 esemplari che rappresentano sei specie imparentate del solo Lago Vittoria. Confrontando questi genomi fra loro e con quelli degli spinarelli – una famiglia di pesci meno diversificata – abbiamo identificato vari caratteri dei genomi dei ciclidi che aiutano a spiegare la diversità del gruppo.

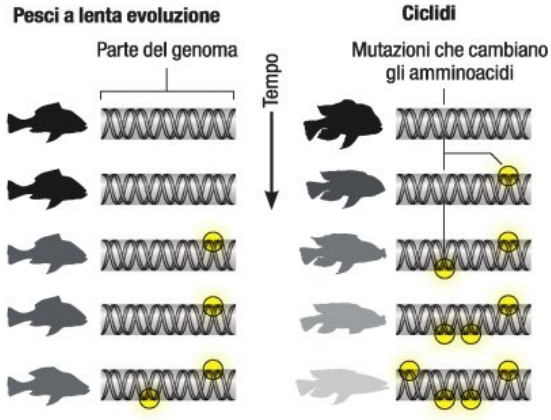
Una delle prime cose che il Cichlid Genome Consortium ha cercato in questi genomi erano le mutazioni che hanno prodotto sostituzioni di amminoacidi nelle proteine; nelle cellule le proteine svolgono gran parte del lavoro e molti geni specificano la sequenza degli amminoacidi che legati tra loro formano una data proteina. Un eccesso di proteine con sostituzioni di amminoacidi sugge-

Indizi genomici

Recenti sequenziamenti e analisi di genomi di ciclidi africani hanno rivelato diversi meccanismi che potrebbero aver favorito la rapida diversificazione dei ciclidi in una miriade di specie. Alcuni di questi meccanismi possono anche contribuire a spiegare un altro aspetto misterioso di questo gruppo di pesci: l'estremo livello di evoluzione parallela, in cui gli stessi tratti altamente specializzati sono emersi più e più volte.

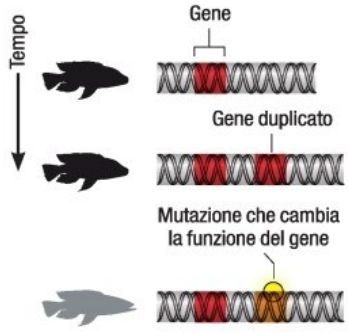
Mutazioni abbondanti

Il gran numero di mutazioni che hanno prodotto cambiamenti negli amminoacidi delle proteine suggerisce che i relativi geni hanno subito intense pressioni selettive che li hanno fatti evolvere in fretta.



Duplicazioni geniche

I genomi dei ciclidi hanno un tasso elevato di duplicazioni geniche, in cui errori nella replicazione del DNA producono copie multiple di uno stesso gene. Le copie in più possono cambiare funzione senza danneggiare l'ospite, e aiutarne così l'adattamento all'ambiente.



rirebbe che i geni in cui ci sono le relative mutazioni hanno subito forti pressioni selettive per evolvere rapidamente; le condizioni cioè erano tali che gli esemplari che acquisivano certi cambiamenti di amminoacidi ottenevano grossi vantaggi in termini di sopravvivenza o riproduzione. Abbiamo trovato che anche la specie di tilapia da noi sequenziata, un ciclide evolutivamente banale rispetto agli altri, aveva molte più mutazioni di questo tipo rispetto agli spinarelli. E i ciclidi dei gruppi ultradiversificati dei laghi Malawi e Vittoria avevano tassi di mutazioni varie volte superiori a quello delle tilapie. Di molti dei geni interessati sappiamo che sono coinvolti nello sviluppo delle mascelle, il che sembra sensato, vista l'enorme varietà degli adattamenti alimentari osservati nei ciclidi. Un meccanismo che ha affrettato la speciazione nei ciclidi, quindi, è un'intensa pressione selettiva su numerosi geni.

Ma anche singoli geni possono essere importanti. Abbiamo trovato prove per cui c'è un unico gene che determina l'orientamento delle strisce scure nei ciclidi. I geni che già da soli portano a grandi differenze nell'aspetto di un organismo, come per le strisce, possono spiegare come mai ci sono tanti tipi di ciclidi.

Un'altra cosa che ci interessava era cercare copie multiple di singoli geni. Da decenni sappiamo che la duplicazione dei geni – dovuta a errori nella replicazione del DNA – è uno dei meccanismi più importanti con cui possono diversificarsi rapidamente le funzioni dei geni. In sostanza, se un gene viene duplicato, la nuova copia può cambiare senza però togliere all'animale la proteina codificata nel gene stesso, perché l'altra copia continua a funzionare, e il cambiamento può contribuire all'adattamento dell'organismo all'ambiente. Di norma invece i geni hanno forti vincoli nei cambiamenti che possono subire senza danneggiare l'«ospite». La nostra analisi genomica mostra che i ciclidi hanno tassi di duplicazione genica fino a cinque volte superiori rispetto a quelli di pesci «normali» come gli spinarelli.

Un terzo tipo di meccanismo genico che abbiamo analizzato è l'attività dei cosiddetti geni saltatori (*jumping gene*). In un tipico pesce, tra il 16 e il 19 per cento del genoma è fatto di queste sequenze di DNA, che non svolgono una funzione evidente ma fanno copie di se stessi e saltano da un punto all'altro del genoma. Possono essere una forza dell'evoluzione se si inseriscono abbastanza vicino a un gene codificante per una proteina da modificarne la funzione. Nei genomi dei ciclidi abbiamo trovato segni rivelatori di vari periodi di rapido accumulo di geni saltatori, fra cui uno coincidente con la radiazione evolutiva del Lago Vittoria. La coincidenza suggerisce che i geni saltatori possano aver contribuito alla diversificazione dei ciclidi nel corso di questi eventi.

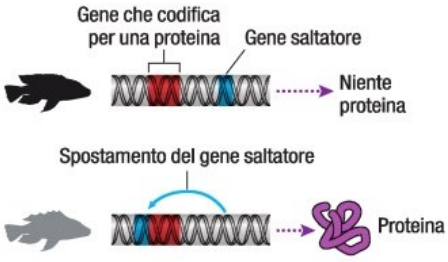
Abbiamo anche esaminato sequenze di DNA che di norma non cambiano molto. Certe regioni del genoma che non specificano gli amminoacidi delle proteine tendono a essere altamente conservate per lunghi archi di tempo evolutivo. Sono i cosiddetti elementi non codificanti conservati (CNE), che probabilmente influiscono sul funzionamento dei geni, altrimenti l'accumulo di mutazioni casuali, come in genere avviene nel tempo nelle regioni non conservate, renderebbe queste regioni diverse da una specie all'altra. I ciclidi condividono diversi CNE fra loro e con specie imparentate più alla lontana, come gli spinarelli. Ma quando abbiamo studiato il DNA più da vicino abbiamo trovato che sebbene i CNE dei ciclidi siano abbastanza simili tra una specie e l'altra da poterli riconoscere, in realtà sono cambiati più di quanto ci si poteva aspettare. Il nostro confronto tra i genomi dei ciclidi ha scoperto che circa il 60 per cento dei CNE aveva sperimentato significativi cambiamenti in qualche particolare linea di discendenza. Questa percentuale elevata e inattesa ha fatto supporre che i geni a cui sono legati questi CNE potessero aver subito un cambiamento di funzione, un'intuizione confermata da successivi esperimenti: la funzione dei CNE dei ciclidi, sia quelli conservati sia quelli alterati, è stata studiata inserendo questo materiale genetico nel genoma di esemplari di *Danio rerio*, o pesce zebra, trovando che i CNE alterati accendevano i geni associati in modi diversi da quelli non alterati, segno inequivocabile che nei ciclidi l'evoluzione ha prodotto mutamenti di funzioni geniche.

Un'altra categoria di materiale genetico che tende a essere altamente conservata da una specie all'altra è quella dei microRNA. I microRNA sono piccole molecole che agiscono da interruttori per i geni, dicendo loro dove e quando devono funzionare. Con sorpresa, ne abbiamo trovati 40 che non erano mai stati visti in altri pesci. Abbiamo quindi studiato gli embrioni dei ciclidi per vedere in quali parti del corpo questi microRNA accendono e spengono geni. In questo modo abbiamo scoperto che agiscono in maniera altamente specifica, attivando e disattivando geni solo in certi tessu-

Illustrazione di Jen Christiansen

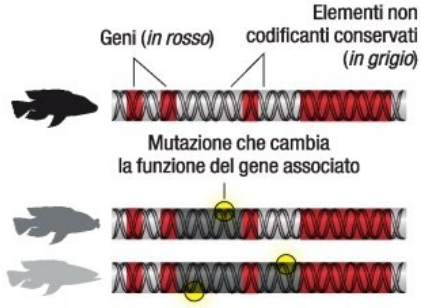
Geni saltatori

Le sequenze di DNA che fanno copie di se stesse e saltano in nuovi punti del genoma sono dette elementi trasponibili o geni saltatori. A seconda di dove finisce, un gene saltatore può modificare la funzione di un gene vicino che codifica per una proteina. Nei ciclidi ci sono stati vari periodi di rapido accumulo di geni saltatori, che forse ne hanno accelerato l'evoluzione.



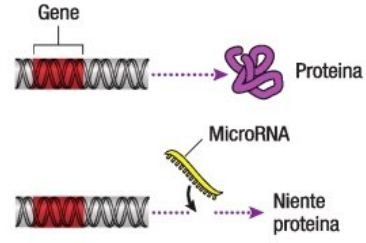
Mutazioni in DNA che in genere non cambia

Alcune regioni che non codificano per proteine tendono a essere conservate nell'evoluzione, forse perché influiscono sul funzionamento dei geni. I ciclidi hanno più mutazioni in alcune di queste regioni rispetto alle attese, mostrando uno schema per cui i geni associati hanno cambiato funzione.



Nuovi microRNA

Anche frammenti di materiale genetico detti microRNA, che possono impedire ai geni di produrre proteine, tendono a essere conservati. I ciclidi hanno più microRNA nuovi di altri pesci. Grazie alla capacità di controllare i geni in particolari tessuti, questi microRNA avrebbero reso possibile il modellamento da cui sono emerse le specializzazioni alimentari dei ciclidi.



ti: per esempio, in una particolare zona dello scheletro facciale. La loro attività mirata suggerisce che i microRNA abbiano reso possibile la precisa opera di modellamento che ha dato origine, fra l'altro, alle varie specializzazioni alimentari dei ciclidi.

Siamo ancora lontani dal capire in pieno se e come tutte le centinaia di microRNA del genoma dei ciclidi alimentino effettivamente il cambiamento evolutivo, ma certo sono forti candidati per questo ruolo. La nostra ipotesi è che i microRNA, impedendo che i geni si attivino nel posto e al momento sbagliato, possano promuovere una maggiore varietà e una maggiore precisione nell'intricata coreografia di geni interagenti a cui si devono piccole differenze in denti, ossa mascellari, schemi di colorazione, comportamenti di corteggiamento e via dicendo, cioè la variazione che poi è la base dell'adattamento e della speciazione.

Il vecchio è nuovo

Questa prima incursione nei genomi dei ciclidi fa pensare che le mutazioni casuali nuove, come quelle osservate nei CNE e quelle che hanno portato ai nuovi microRNA, abbiano giocato un ruolo significativo nella straordinaria evoluzione di questi pesci. Sospettiamo tuttavia che il grosso del lavoro possa averlo fatto un tipo di variazione genetica relativamente più antico, che include geni duplicati e geni saltatori. Queste varianti sono rimaste silenti nel genoma fino a quando nuove opportunità ecologiche, come quelle apparse quando gli ancestrali ciclidi fluviali hanno colonizzato i grandi laghi africani, non le hanno improvvisamente rese vantaggiose. Sfruttando quell'antica riserva di variazione genetica, la selezione naturale ha poi generato specie adatte ai nuovi habitat.

Riteniamo che il tipo di variazione antica abbia avuto un ruolo chiave perché quando analizziamo i genomi di queste specie di ciclidi non troviamo molte differenze genetiche già fissate fra le specie. Insomma, ci sono pochi casi di geni per cui tutti i membri di una certa specie sono portatori della stessa variante. Il *pool* genetico di una specie, invece, mantiene vecchie varianti geniche anche dopo la separazione del pesce dalla specie progenitrice per formarne una nuova. E una giovane specie non solo può conservare DNA dei predecessori, ma può essere abbastanza simile ad altre specie imparentate da continuare a incrociarsi e ibridarsi con esse. Questo genere di incroci permette alle nuove varianti geniche di diffondersi oltre le barriere di specie, utile materiale genico da riciclare al bisogno. La conservazione dell'antica variazione genetica, oltre ad aver alimentato la rapida diversificazione dei ciclidi, può anche spiegare come gli stessi tratti assai specifici possano essersi evoluti più volte in linee di discendenza separate: sospettiamo che tratti come la bocca asimmetrica o le labbra alla Angelina Jolie non siano emersi ogni volta come nuovi; piuttosto, sono stati richiamati in servizio più volte gli stessi geni e interruttori genetici: un'ipotesi che attende una verifica sperimentale.

I meccanismi genomici descritti non hanno alimentato da soli l'evoluzione dei ciclidi. Di sicuro i fattori ambientali hanno avuto un ruolo cruciale nel determinare andamenti e tassi di diversificazione del gruppo. Le differenze nei livelli di diversità delle varie radiazioni dei ciclidi nel mondo confermano questa idea: in Africa e in Nicaragua, le radiazioni avvenute in laghi con habitat più complessi, e quindi con più nicchie ecologiche, hanno più specie rispetto ai laghi con habitat più semplici. In aggiunta alla speciazione avvenuta mentre nei ciclidi si evolvevano specializzazioni alimentari per riempire queste nicchie si è verificata un'ulteriore diversificazione con l'emergere di differenze nella pigmentazione e di preferenze da parte delle femmine per particolari colorazioni.

Abbiamo ancora molto da imparare a proposito dei ciclidi. Tuttavia, ora che disponiamo di genomi completi e di potenti nuove tecniche con cui analizzarli, le nostre conoscenze avanzeranno in maniera davvero rapida. Mi aspetto che i meccanismi della rapida speciazione dei ciclidi continuino a essere un'area di intensa ricerca. Presto avremo una comprensione molto più profonda del linguaggio del genoma e del DNA che collega tutti gli esseri viventi anche se li separa. ■

PER APPROFONDIRE

The Genomic Substrate for Adaptive Radiation in African Cichlid Fish. Brawand D. e altri, in «Nature», Vol. 513, pp. 375-381, 18 settembre 2014.

Genetic Mapping of Horizontal Stripes in Lake Victoria Cichlid Fishes: Benefits and Pitfalls of Using RAD Markers for Dense Linkage Mapping. Henning F. e altri, in «Molecular Ecology», Vol. 23, n. 21, pp. 5224-5240, novembre 2014.

I ciclidi dei laghi di Rift africani. Stiassny M.L.J. e Meyer A., in «Le Scienze» n. 369, maggio 1999.

Vivere con una frana

Ad Ancona un sistema di allerta precoce unico in Europa sorveglia in tempo reale una zona franosa a ridosso di infrastruttre strategiche e su cui abitano numerose famiglie

di Valerio Gualerzi

Dicembre 1982.
Cittadini anconetani camminano sul manto stradale della via Flaminia sollevato e spaccato dalla frana che pochi giorni prima aveva colpito una vasta aerea del Comune di Ancona.

Valerio Gualerzi è giornalista di «la Repubblica», segue le tematiche legate ai cambiamenti climatici, curando tra l'altro il blog «2050».

Il vecchio adagio raccomanda: «Se non puoi sconfiggere il tuo nemico, cerca di allearti con lui». Un consiglio difficile da accettare se siamo chiamati a combattere contro una catastrofe naturale. Quello che si può tentare di fare è conviverci, garantendo la massima sicurezza della popolazione, risparmiando un bel po' di soldi e diventando una volta tanto un modello internazionale.

Ed è questa la strategia scelta da Ancona nel corpo a corpo che da oltre trent'anni è costretta a ingaggiare con quella che tutti in città chiamano semplicemente la «grande frana del 1982».

Sono le 21.00 del 12 dicembre quando la collina Montagnolo inizia a scivolare verso il mare, interrompendo la sua corsa solo dopo circa dieci ore. Case e negozi sono travolti, l'ospedale oncologico e quello geriatrico vengono distrutti, la ferrovia adriatica e la via Flaminia sono sbriciolate come cracker. Per fortuna non ci sono vittime, ma il bilancio è comunque pesante: 3661 persone evacuate e oltre 500 rimaste senza lavoro, mentre l'area interessata è di 220 ettari, pari all'11 per cento del territorio comunale. Una zona che non ha mai smesso di muoversi e assestarsi e oggi è tenuta sotto costante osservazione da un sistema di *early warning* praticamente unico in Europa, meta di viaggi di studio per geologi e tecnici della protezione civile di mezzo mondo.

Il giusto intervento

Passata la prima emergenza, l'amministrazione comunale ha dovuto porsi il problema di che cosa fare di questo tremolante budino di argilla piazzato in un punto vitale della città, a ridosso di infrastrutture strategiche come strada, ferrovia e porto. L'ambizione iniziale è stata naturalmente intervenire in maniera ingegneristica, stabilizzando la zona. La frana è stata quindi tenuta sotto controllo e studiata, quasi fosse un paziente su un letto d'ospedale, per elaborare diagnosi e cura, per capire come e dove intervenire. «Tenendo conto di tutte le ricerche svolte nell'arco di circa 25 anni siamo arrivati alla conclusione che si tratta di una *deep-seated landslide* riattivata da una lunga fase di precipitazioni», spiega Stefano Cardellini, geologo del Comune di Ancona e responsabile del sistema di allerta precoce. «L'innesco – ricostruisce Cardellini – è stato un lungo periodo di pioggia su una nuova fatturazione generatasi dopo una crisi sismica avvenuta dieci anni prima e durata sei mesi. La frana coinvolge argille e argille siltose (Pliocene-Pleistocene), fratturate e alternate a sottili livelli sabbiosi».

Sulla base di questo referto finale il bollettino medico è spietato: la grande frana di Ancona non è curabile se non a un costo esorbitante, che non garantirebbe comunque da possibili future ricadute. «Le indagini geologiche e geotecniche – ricorda Cardellini - conclusero che il consolidamento, un progetto presentato nel 2000 che prevedeva opere di drenaggio e un rilevato da eseguire al piede della frana coinvolgendo e stravolgendo l'andamento attuale della linea di costa, risultava inaccettabile sia per le ingenti somme da stanziare sia per il forte impatto ambientale».

Per valutare il coefficiente di sicurezza garantito da un'opera di consolidamento i geologi usano una formula matematica che lascia poco spazio alle interpretazioni. Il calcolo è il frutto del rapporto tra le forze stabilizzanti e quelle destabilizzanti lungo le diverse superfici di scorrimento individuate nell'interno della massa franosa. La forza che agisce sempre sulle masse litoidi, ed è alla base delle frane condizionandole nella loro dinamica, è la forza di gravità. In questo rapporto al numeratore vengono considerati tutti i fattori che agiscono per la stabilità del versante di scorrimento, mentre al denominatore quelli che tendono a destabilizzarlo. Tenendo conto che l'equilibrio delle masse è pari all'unità, può accadere che a seguito di forti piogge, azioni antropiche, sismi o altri fattori destabilizzanti la frana si inneschi e collassi.

Per semplificare, si può considerare la frana come le mezzelune che permettono a un cavalluccio di dondolare. Per bloccarla è necessario porre un peso sull'estremità a monte o su quella a valle. Per l'evento di Ancona l'unico intervento possibile sarebbe stato a valle, quindi in mare.

«Nel nostro caso – sottolinea Cardellini - la superficie più pro-

IN BREVE

Tra il 12 e il 13 dicembre 1982 la collina Montagnolo di Ancona scivolò per circa dieci ore. L'evento non causò morti, ma il bilancio fu pesante in termini di sfollati, danni a strade, linea ferroviaria ed edifici.

Da allora la zona non ha smesso di spostarsi, seppure lentamente, ed è abitata. Indagini geologiche hanno stabilito che non è possibile consolidare in modo definitivo la frana, se non a un costo esorbitante e con il rischio di ricadute. Il Comune ha quindi attuato una politica di convivenza.

La frana è monitorata con un sistema di allerta precoce unico in Europa e in grado di far scattare un'evacuazione che garantisca l'incolumità degli abitanti, a costi irrisori rispetto al consolidamento. Il sistema è anche un esempio di prevenzione nell'Italia dei tanti Comuni a rischio idrogeologico.

Roberto Koch/Contrasto (*pagine precedenti*)

Stesso obiettivo, viste diverse. Sotto a sinistra, un'immagine satellitare dell'area monitorata (*linea gialla*) per osservare i lenti movimenti del terreno, che non si sono mai interrotti dal 1982; accanto la sala di monitoraggio e in basso un'area della frana in una vista aerea.

Cortesia Valerio Gualerzi (*tutte le foto in questa pagina, 3*)

fonda ha valore 1,013, cioè il numeratore è di pochissimo superiore al denominatore, quindi basta una pioggia insistente o un sisma per aumentare le forze destabilizzanti al denominatore e far innescare la frana. Con i lavori di stabilizzazione proposti, questo valore sarebbe diventato 1,093, poca cosa. Realizzando un rilevato di stabilizzazione lungo più di un chilometro ed esteso per circa 200-300 metri dalla linea di costa, portando enormi quantità di materiale inerte da altri siti come le cave di Apricena, in Puglia, si poteva ottenere infatti un miglioramento del coefficiente di sicurezza di appena il 5 per cento. Aggiungendo la realizzazione di un complesso reticolo di trincee drenanti profonde si arrivava a un miglioramento dell'8 per cento. Risultati molto modesti, soprattutto a fronte di una spesa stimata in 60 milioni di euro. Senza contare che i lavori di messa in posa avrebbero imposto un lungo stop delle attività portuali, arrecando gravi danni alle economie e alle produttività della città per lunghi anni».

Sulla scorta di questi calcoli, nell'amministrazione comunale è maturata quindi la convinzione di doversi rapportare al fenomeno franoso con un atteggiamento diverso, orientato non a un'eliminazione del rischio ma a una riduzione dello stesso, ovvero di possibile «convivenza leggera». Anche perché in tutti questi anni 70 famiglie, ignorando tutte le ordinanze di sgombero emanate dalla Regione Marche, con la frana non hanno mai smesso di conviverci, continuando ad abitare nelle case che sorgono

in piena zona di rischio pur in assenza di adeguati meccanismi di allerta. La scelta è stata quindi realizzare una rete di monitoraggio costante e accurato, come previsto dall'apposita legge approvata nel 2002 dal Consiglio Regionale, e di usare la rete per alimentare un sistema di *early warning* capace di far scattare, in caso di necessità, un'evacuazione nei tempi necessari a garantire l'incolumità degli abitanti. Un'opzione giudicata vincente innanzitutto dal punto di vista dei costi.

A fronte dei 60 milioni di euro necessari per la stabilizzazione, la spesa per l'acquisto della strumentazione impiegata per i rilevamenti è stata di 1,5 milioni, ai quali vanno aggiunti su base decennale un milione per la loro manutenzione e 800.000 euro per la gestione. «Per fortuna rispetto ad altre catastrofi naturali questo tipo di frana ci consente di reagire in tempi calcolati in ore e non in minuti», dice Cardellini. «In tutta Europa – aggiunge il geologo - c'è una sola soluzione simile a quella adottata qui, ma si trova in una zona disabitata di un fiordo norvegese dove si teme la frana possa scatenare un effetto tsunami. Ancona è invece l'unico posto dove una popolazione di oltre 60 famiglie vive sopra una frana che, sebbene lentamente, non ha mai smesso di muoversi».

Tre occhi per la frana

Come in quei film dove per compiere la rapina del secolo occorre superare un sofisticato sistema antifurto capace di rilevare vibrazioni, movimenti e calore umano, allo stesso modo l'inestimabile tesoro rappresentato dall'incolumità degli anconetani è stato messo al sicuro con una ragnatela di sensori che rilevano ogni sussulto della collina del Montagnolo. Tre colonne indicate con la sigla DMS sondano gli spostamenti delle viscere fino a una profondità di 96 metri. Queste colonne sono provviste di moduli in acciaio della lunghezza di un metro uniti da speciali giunti deformabili che al loro interno ospitano 85 inclinometri biassiali, due sensori piezometrici e 85 sensori di temperatura e al fondo una bussola digitale. Il grande occhio dei satelliti vigila poi dall'alto su eventuali spostamenti del terreno attraverso 34 antenne GPS, 26 a singola frequenza L1 (disposti sulle 64 case abitate) e 8 a doppia frequenza L1+L2 su specifiche cabine poste sia nell'interno del perimetro della frana che al di fuori in aree stabili.

Una terza forma di controllo è garantita quindi dalle sette stazioni topografiche automatizzate di alta precisione che puntano costantemente i loro raggi infrarossi contro i 230 prismi di riflessione collocati sulle 64 case abitate e sulle strutture e infrastrutture della collina. L'ultima forma di monitoraggio è caratterizzata da più di 20 sensori clinometrici Nivel, posti sulle case tenute in osservazione e sulle cabine di monitoraggio, in grado di verificare i movimenti con una sensibilità misurabile al decimo di millimetro.

Infine, per tenere sotto controllo la pioggia, probabilmente il più temibile dei nemici, due stazioni meteorologiche analizzano il volume delle precipitazioni. «L'integrazione dei differenti strumenti – spiega Cardellini - ci permette di osservare in 3D un gran numero di punti precedentemente individuati e tenerli sotto controllo con differenti metodi e da differenti punti di vista, minimizzando le influenze negative delle variabili ambientali».

Una questione di millimetri

Tutte le informazioni convergono nella centrale di registrazione in una sede comunale attraverso un sistema di trasmissione progettato su due differenti tipologie per dare ridondanza al sistema stesso, in modo da non rimanere senza dati in caso di cattivo funzionamento. Il primo è costituto da una rete WiFi Standard HiperLan mentre al secondo livello la trasmissione avviene attraverso GSM-CSD (*circuit switch mode*).

Il sistema di registrazione campiona quindi in tempo reale fino a sei ore gli strumenti e registra i dati, che poi sono scaricati per le analisi e gli studi o direttamente dalla centralina o via Internet dal Gruppo di controllo del monitoraggio in tempo reale. Gli strumenti inclinometrici DMS, GPS, clinometri murari sugli edifici e le stazioni robotizzate sono tarati su movimenti maggiori di 1-5 millimetri (a seconda dei casi) in modo da poter scartare tutti i segnali al di sotto di questo intervallo. In seguito a un movimento maggiore, lo strumento si attiva e manda un segnale a una centralina di registrazione. Da qui a sua volta parte un impulso via modem che attiva due chiamate telefoniche a due componenti del Gruppo di controllo. Nel caso di un movimento reale si attiva quindi il Centro operativo comunale dell'amministrazione (COC), che predispone sopralluoghi, misurazioni sul posto ed eventualmente avvia in contemporanea il piano di evacuazione.

Fortunatamente fino a oggi non si è mai arrivati a un vero allarme, ma come detto la frana non ha mai smesso di muoversi.

«Le osservazioni e le analisi dei dati di superficie, a parte le va-

Roberto Koch/Contrasto (*foto in questa pagina e nella pagina a fronte, 2*)

Non solo strade. Oltre alle vie di comunicazione (*a fronte*), la frana del 12 dicembre 1982 colpì pesantemente anche zone abitate del Comune di Ancona.

riazioni registrate in relazione alla variazione diurna e stagionale, in particolari aree già conosciute per una maggiore attività, mostrano alcuni piccoli movimenti», dice Cardellini. «I GPS a singola frequenza L1 installati su qualche casa abitata nell'interno dell'area in frana – prosegue - hanno registrato movimenti di 1-4 centimetri verso nord, la direzione di frana. Le aree interessate sono riconducibili alla zona dove nel 1982 la frana si è attivata con maggiore profondità, 75 metri, e dove si rilevano i due *trenches* contenenti materiale plastico colluviale e dove avvengono le maggiori infiltrazioni di acque. A ogni modo questi movimenti non preoccupano, perché sono identificati in aree ristrette e interessano costruzioni fondate su materiali deformabili e influenzabili dalla imbibizione che tende a variare la componente volumetrica delle argille». È importante sottolineare, ricorda ancora il geologo, che questi dati hanno permesso di verificare la sensibilità del sistema di monitoraggio anche per i movimenti più piccoli che interessano i terreni colluviali.

Invertire una tendenza

In un paese come l'Italia, dove condizioni di insicurezza idrogeologica sono presenti in ben 6633 Comuni, l'82 per cento del totale, con una superficie da allarme rosso per frane e alluvioni pari al 9,8 per cento, la scelta di Ancona può essere la soluzione migliore per evitare di ritrovarsi ogni autunno a piangere sulla pioggia versata?

Erasmo D'Angelis, ex sottosegretario al Ministero delle infrastrutture e attuale capo struttura di missione del Governo contro il dissesto idrogeologico, ne è convinto. «In oltre 1000 municipi – spiega - ci sono abitazioni in aree franose o golenali. Nel 31 per cento delle zone più fragili sono sorti quartieri, nel 56 per cento fabbricati industriali che se colpiti potrebbero mettere a rischio oltre che la vita dei dipendenti anche l'ambiente per l'eventualità di sversamenti di inquinanti. Nel 20 per cento dei casi in piena zona a rischio idrogeologico ci sono strutture sensibili come scuole, ospedali, municipi, mentre nel 26 per cento troviamo anche alberghi e centri commerciali». Secondo D'Angelis, l'avanzato sistema di monitoraggio della grande frana di Ancona è un esempio di come fare prevenzione salvando vite umane, anzi di più: è un modello che va esteso e applicato nelle aree più vulnerabili e a rischio del nostro paese per iniziare a invertire una pessima tendenza.

«Occorre mettere fine – dice D'Angelis – a una lunga e triste storia di interventi eseguiti solo in emergenza dopo catastrofi immani e a una spesa pubblica erogata solo per riparare i danni e risarcire le vittime. È dal 1945 che per questo motivo lo Stato stacca ogni anno un assegno da 5 miliardi di euro. Viviamo in una penisola che è un catalogo di grandi rischi, ed è essenziale mettere in sicurezza i territori, anticipare le tragedie, prevedere dove e quando può franare un'area sottoposta a smottamenti e indebolita dalla pioggia, resa fragile dalla cementificazione o dai disboscamenti selvaggi, con un ragionevole grado di precisione. Monitorare le aree più vulnerabili, tenere sotto controllo l'Italia che rischia con i più moderni programmi da affiancare alle reti idro-pluviometriche nei bacini fluviali significa ridurre il tempo tra l'osservazione dei precursori di un evento e i suoi effetti».

«Si tratta di un clamoroso aumento di sicurezza – conclude D'Angelis – capace di rafforzare la meteorologia numerica applicata che già oggi ci mette a disposizione tutti i parametri atmosferici determinanti e i loro possibili effetti al suolo, componendo scenari evolutivi anche di dettaglio. Insomma, quando inizia un evento franoso o meteo, questo deve essere immediatamente "agganciato" per determinarne l'evoluzione con notevole precisione e rapidità per ridurre i pericoli». ■

PER APPROFONDIRE

Resilienza. La scienza di adattarsi ai cambiamenti. Zolli A. e Healy A.M., Rizzoli, Milano, 2014.

Landslide Science and Practice Volume 2: Early Warning, Instrumentation and Monitoring. Margottini C., Canuti P. e Sassa K., Springer, Milano, 2013.

Sito web del progetto Adapting to climate Change in Time: **http://www.actlife.eu/EN/index.xhtml.**

Convivenza delle popolazioni con un'area a rischio frana: il caso di Ancona. Geosciences and Information Technologies, sezione della Società geologica Italiana: **http://www.gitonline.eu/GITTMP/GIT2009/GIT_Cagli_2009/Presentazioni_GIT%2009/II_sessione/II_ses_3_Cardellini.pdf.**

Geological Evolution and Landslide Mechanisms Along the Central Adriatic Coastal Slopes. Santaloia F., Cotecchia V. e Monterisi L., in «Proceedings of the Skempton Conference», Vol. 2, pp. 943-954, Londra, 2004.

COME SOPRAVVIVERE ALLA CYBERGUERRA

PRIMO PASSO: smettete di contare sulla protezione degli altri

di Keren Elazari

Agli specialisti di cybersicurezza piace dire che ci sono due tipi di organizzazioni: quelle che sono state colpite e quelle che non lo sanno ancora. La cronaca recente dimostra che questa non è solo una battuta. I cybercriminali hanno rubato i dati delle carte di credito e personali di milioni di persone ad aziende come Target, Home Depot e JPMorgan Chase. Gli esperti di sicurezza hanno scoperto difetti fondamentali in elementi costitutivi di Internet, come la cosiddetta vulnerabilità Heartbleed in OpenSSL, una diffusa libreria di programmi di crittografia. In seguito a un attacco con distruzione di dati su vasta scala, Sony Pictures Entertainment è tornata a usare carta e penna. I criminali hanno avuto accesso ai dati di oltre 80 milioni di clienti di Anthem, un colosso dell'assicurazione sanitaria. E questi sono solo i casi di cui siamo a conoscenza.

Con ogni probabilità, nei prossimi anni i cyberattacchi si intensificheranno, ed è un problema per tutti noi. Oggi siamo tutti connessi al cyberspazio, in un modo o nell'altro – tramite i nostri telefoni, computer portatili e reti aziendali – e quindi siamo tutti vulnerabili. Le reti, i *server*, i *personal computer* e gli *account on line* piratati sono una risorsa essenziale sia per i cybercriminali sia per le spie governative. La vostra rete aziendale o il computer privato con cui giocate può diventare facilmente un'altra arma nell'arsenale dei criminali, o delle cyberspie finanziate con denaro pubblico. I computer compromessi possono essere usati come tramite per il prossimo attacco o entrare a far parte di una *botnet*, una rete di apparecchi controllati come zombie da malintenzionati, usata di ora in ora per sferrare attacchi di *denial of service* o diffondere spam.

Di fronte a minacce come queste, il riflesso naturale dei governi, negli Stati Uniti e altrove, è militarizzare il cyberspazio, cercando di presidiare il mondo digitale tramite burocrazie centralizzate e agenzie di spionaggio. Questo approccio però non funzionerà mai. Anzi, per motivi che vedremo tra poco, potrebbe addirittura peggiorare la situazione. La cybersicurezza è come un problema di salute pubblica: istituzioni governative come i Centers for Disease Control and Prevention hanno un ruolo importante, ma da sole non possono fermare la diffusione delle malattie. Possono fare il proprio lavoro solo se i cittadini fanno altrettanto.

L'enormità del cyberspazio

Uno dei motivi per cui proteggere il cyberspazio è così difficile è che non esiste un solo «cyberspazio», bensì un enorme sistema di sistemi interconnessi, che continua a crescere e trasformarsi. Per capire meglio questo aspetto dobbiamo tornare indietro di mezzo

IN BREVE

Nei prossimi anni i cyberattacchi diventeranno più frequenti. Il problema non riguarda solo le grandi aziende e i governi: chiunque usi la tecnologia moderna può essere colpito.

Non sono a rischio solo dati astratti o «segreti»: oggi la cybersicurezza consiste nel proteggere cose, infrastrutture e processi, cioè le tecnologie alla base della vita moderna.

Da soli, governi e aziende non possono mettere in sicurezza il cyberspazio. Per raggiungere l'obiettivo servirà un sistema immunitario diffuso, che comprenda gli hacker.

Anche i privati devono fare la loro parte. Ogni persona connessa in rete deve sostenere il sistema immunitario collettivo dedicandosi all'equivalente informatico dell'igiene personale.

Keren Elazari, esperta israeliana di cybersicurezza, ha collaborato con aziende leader nella sicurezza informatica, organizzazioni governative e società della lista Fortune 500. Il suo discorso sugli hacker alla conferenza TED è stato visto oltre 1,2 milioni di volte, tradotto in 24 lingue e scelto per la lista di TED delle «idee più potenti».

GUERRA

secolo e ricordare l'opera di Norbert Wiener, professore di matematica al Massachusetts Institute of Technology. Nel 1948 Wiener si ispirò a una parola del greco antico per indicare una nuova disciplina scientifica che stava sviluppando: la cibernetica, che definì come lo studio del «controllo e della comunicazione in animali e macchine». Il termine originale greco, *kybernētēs*, indicava il timoniere o pilota che dirigeva e comandava le navi che veleggiavano nel Mediterraneo. Analogamente, il cyberspazio andrebbe immaginato come l'insieme di tecnologie elettroniche e digitali interconnesse che permettono il comando e le comunicazioni di tutti i sistemi su cui si basa la vita moderna. Il cyberspazio comprende un'enorme gamma di tecnologie per il comando a distanza e le comunicazioni, dalle pompe di insulina impiantate nel corpo che comunicano via radio ai sistemi satellitari di navigazione.

Il cyberspazio non è un bene pubblico come le acque internazionali o la Luna. Non è un insieme di territori che i governi o gli eserciti potrebbero controllare, nemmeno se glielo chiedessimo. Gran parte delle tecnologie e delle reti che formano il cyberspazio è posseduta e gestita per profitto da conglomerati multinazionali.

Il numero e la varietà delle tecnologie comprese in questo spazio sono in rapida crescita. Secondo Cisco Systems, azienda produttrice di tecnologia per networking, entro il 2020 saranno connessi a Internet 50 miliardi di apparecchi, in gran parte dispositivi e sistemi legati a impieghi industriali, militari e aerospaziali. Tutto quello che si connette al cyberspazio è potenzialmente un obiettivo dei cyberattacchi, e chi li sferra è bravo a scoprire i punti deboli di qualsiasi rete. Per esempio, gli *hacker* che hanno violato il sistema *point of sale* dei supermercati Target, rubando i dati a milioni di carte di pagamento, hanno avuto accesso alla loro rete puntando prima a un bersaglio più facile: Fazio Mechanical Services, che gestisce la manutenzione dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento di Target. Le spie cinesi che si ritiene siano entrate nel 2011 nelle reti di Lockheed Martin, attiva nel settore difesa, ci sono riuscite dopo avere violato il sistema di RSA, l'azienda di sicurezza informatica che le forniva i *token* di autenticazione. A sua volta, RSA è stata colpita solo perché un dipendente dell'azienda madre EMC ha ricevuto una e-mail con un allegato Excel che sembrava innocuo e l'ha aperto.

Le «cose» dell'Internet delle cose non sono solo finestre attraverso cui gli aggressori possono intrufolarsi: sono a loro volta potenziali obiettivi di sabotaggio. Già nel 2008, alcuni esperti di sicurezza si sono dimostrati in grado di introdursi a distanza in *pacemaker* impiantati. Successivamente, alcuni hacker sono riusciti a dirottare con segnali radio pompe di insulina impiantate, ordinando agli apparecchi di rilasciare insulina nel sangue dei pazienti, con risultati potenzialmente letali.

Anche le infrastrutture fisiche sono minacciate dagli attacchi, come abbiamo saputo nel 2010, quando si è scoperto che era stato il famigerato virus Stuxnet a distruggere gran parte delle centrifughe per l'arricchimento dell'uranio in un impianto clandestino a Natanz, in Iran. Stuxnet, ritenuto il frutto di una collaborazione intensa e costosa tra Stati Uniti e Israele, ha dimostrato un concetto rivoluzionario: il codice digitale dei computer è in grado di compromettere e distruggere sistemi analogici fisici. Da allora questa idea è stata confermata da altri attacchi. Lo scorso dicembre, l'ufficio federale tedesco per la sicurezza informatica ha riferito che alcuni hacker avevano violato i sistemi di un'acciaieria, impedendo la chiusura dell'altoforno e provocando «enormi danni al sistema». Tre mesi prima, hacker cinesi avevano attaccato i siti web della U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration che elaborano i dati satellitari usati per l'aviazione, la risposta alle catastrofi e altri compiti critici.

Tutto questo significa che la cybersicurezza non riguarda solo la protezione di computer, reti o server web. Certamente non

riguarda solo la difesa dei «segreti» (come se Google e Facebook non sapessero già quasi tutto di noi). Nel cyberspazio la vera battaglia è per proteggere le cose, le infrastrutture e i processi. Il pericolo consiste nella distruzione e nel sabotaggio delle tecnologie a cui ci affidiamo ogni giorno. Automobii, tessere bancomat e attrezzature mediche. Satelliti per le comunicazioni, reti elettriche e telefoniche. La cybersicurezza riguarda la difesa del nostro modo di vivere.

Il ruolo del governo

Per i governi la messa in sicurezza del cyberspazio è motivo di conflitti. Molte istituzioni, tra cui il Department of Homeland Security degli Stati Uniti, hanno un sincero interesse a proteggere dai cyberattacchi aziende e cittadini della propria nazione. Altre entità governative, invece, possono trarre vantaggio dal fatto che le reti del mondo rimangano piene di punti deboli. Gruppi che agiscono in clandestinità, come la National Security Agency (NSA), investono milioni per scoprire e studiare i difetti tecnici che potrebbero permettere a un intruso di assumere il controllo di un sistema.

Quella che per una persona è una terribile falla nella sicurezza, per un'altra è un'arma segreta. Pensate al *bug* Heartbleed: se avete usato Internet negli ultimi cinque anni, probabilmente le vostre informazioni sono state criptate e decriptate da computer che usavano il software OpenSSL. La tecnologia SSL è alla base di quelle icone con il lucchetto che ormai diamo per scontate nei siti web sicuri. Heartbleed era il risultato di un errore nello sviluppo del programma di base in una delle diffuse estensioni di OpenSSL, «Heartbeat», da cui deriva il nome. Se sfruttato, il bug permetteva alle spie di accedere facilmente a chiavi crittografiche, nomi utente e *password*, vanificando ogni sicurezza offerta dalla cifratura SSL. OpenSSL è rimasto vulnerabile per due anni prima che il bug fosse scoperto separatamente da due gruppi di esperti di sicurezza (uno diretto da Neel Mehta, esperto di sicurezza presso Google, l'altro nell'azienda finlandese Codenomicon). Alcuni giorni dopo, «Bloomberg Businessweek», citando fonti anonime, ha affermato che la NSA sfruttava da anni questo difetto per il cyperspionaggio.

I professionisti della sicurezza condividono le informazioni per creare una specie di sistema immunitario diffuso

Molte delle principali potenze mondiali hanno impiegato i propri migliori talenti tecnologici e milioni di dollari per scoprire e sfruttare le vulnerabilità come Heartbleed. I governi inoltre comprano bug sul mercato libero, contribuendo così ad alimentare il commercio di falle nella sicurezza. Un numero sempre maggiore di aziende, come la francese Vupen Security o Exodus Intelligence con sede ad Austin, in Texas, si è specializzato nella scoperta e nel confezionamento di questi bug preziosi. Anzi, alcuni governi spendono in ricerca e sviluppo più per le azioni offensive che per difendersi: il Pentagono impiega schiere di persone nella ricerca delle vulnerabilità, mentre la NSA spende per la cyber ricerca offensiva due volte e mezza più che per la difesa.

Tutto questo non significa che i governi siano malvagi o nemici della cybersicurezza. È facile capire l'origine delle agenzie come la NSA: il loro lavoro consiste nel raccogliere informazioni strategiche per prevenire azioni terribili, e ha senso che usino tutti gli strumenti a loro disposizione per raggiungere questo obiettivo. Ma un passo importante per la messa in sicurezza del cyberspazio è valutare onestamente costi e benefici delle agenzie governative che approfittano delle vulnerabilità. Un altro è sfruttare in pieno quello che possono fare i governi e non altre istituzioni, per esempio autorizzare, o addirittura costringere, le aziende e altre organizzazioni a condividere i dati sui cyberattacchi.

Sarebbero soprattutto le banche a trarre vantaggio dal condividere queste informazioni, perché in genere i cyberattacchi alle istituzioni finanziarie seguono un modello prevedibile: quando i criminali trovano qualcosa che funziona con una banca, lo provano con un'altra e poi un'altra ancora. Tradizionalmente, però, le banche non rivelano informazioni sugli attacchi perché mettono in dubbio la loro sicurezza. Inoltre evitano di comunicare con i concorrenti; in alcuni casi è vietato dalle leggi antitrust. I governi però possono agevolare la condivisione di informazioni tra le banche. È quello che sta già accadendo negli Stati Uniti con il Financial Services Information Sharing and Analysis Center (FS-ISAC), di cui si avvalgono anche organizzazioni finanziarie globali. E a febbraio il presidente Barack Obama ha firmato un decreto che obbliga le altre aziende a condividere informazioni di questo tipo, sia tra loro sia con il governo.

Possibile aiuto dagli hacker

Fino a quando il codice sarà scritto da esseri umani, le vulnerabilità saranno inevitabili. Spinte da pressioni di mercato sempre più forti, le aziende tecnologiche lanciano nuovi prodotti più rapidamente che mai. Queste aziende farebbero bene a ricorrere all'enorme risorsa umana costituita dalla comunità globale degli hacker. Nell'ultimo anno, catalizzate da eventi come le rivelazioni di Edward Snowden sulla NSA, l'industria tecnologica e la comunità degli hacker hanno aperto alla possibilità di collaborare. Ora centinaia di aziende capiscono il vantaggio di rivolgersi agli hacker con cosiddetti programmi di caccia al bug e ricerca delle vulnerabilità, che offrono incentivi ai ricercatori indipendenti che segnalano vulnerabilità e problemi di sicurezza. Netscape Communications ha creato il primo programma di caccia al bug nel 1995 per trovare falle nel browser Netscape Navigator. Oggi, a distanza di vent'anni, la ricerca ha dimostrato che questa strategia è una delle misure più convenienti mai prese da questa organizzazione e dalla sua erede Mozilla per rafforzare la sicurezza. Le comunità private e pubbliche di professionisti della sicurezza condividono le informazioni su *malware*, minacce e vulnerabilità per creare una specie di sistema immunitario diffuso.

Man mano che il cyberspazio si espande, anche i produttori di automobili, apparecchiature mediche, sistemi di *home entertainment* e altre imprese dovranno cominciare a pensare come le aziende di cybersicurezza. Si tratta di incorporare la sicurezza nel processo di ricerca e sviluppo: investire nella sicurezza di prodotti e servizi già nella fase di progettazione, non per un ripensamento o in seguito a imposizioni del governo. Anche in questo caso la comunità degli hacker può dare un aiuto. Nel 2013, per esempio, gli esperti di sicurezza Joshua Corman e Nicholas Percoco hanno lanciato un movimento, detto «I Am the Cavalry», esortando gli hacker a eseguire una ricerca responsabile sulla sicurezza che sia in grado di far progredire il mondo, in particolare in aree criti-

che come le infrastrutture pubbliche e le tecnologie automobilistiche, mediche e domotiche. Un'altra iniziativa, intrapresa dai noti esperti di sicurezza Mark Stanislav e Zach Lanier, si chiama «BuildItSecure.ly» e punta a creare una piattaforma per lo sviluppo di applicazioni sicure per l'Internet delle cose.

La buona notizia è che questo sistema immunitario diffuso si sta rinforzando. A gennaio Google ha lanciato un nuovo programma, che si aggiunge al suo già esistente di caccia al bug: offre sovvenzioni agli esperti di sicurezza per incentivarli a esaminare i suoi prodotti. Con questo programma si riconosce che perfino le aziende che hanno al loro interno i migliori talenti tecnologici al mondo potrebbero sfruttare la prospettiva esterna di hacker ben intenzionati. Sono coinvolti perfino alcuni governi. Per esempio, il Centro nazionale olandese per la cybersicurezza ha creato un suo programma di rivelazione responsabile, che permette agli hacker di segnalare vulnerabilità senza il rischio di ritorsioni legali.

La brutta notizia è che alcuni elementi dell'approccio alla cybersicurezza adottato dall'amministrazione Obama potrebbero sostanzialmente criminalizzare pratiche e strumenti di uso comune nella ricerca delle vulnerabilità e quindi indebolire questo sistema immunitario in corso di sviluppo. Nella comunità dei ricercatori, molti temono che sia la versione attuale del Computer Fraud and Abuse Act sia le modifiche proposte alla legge definiscano l'*hacking* in modo così generico che perfino cliccare su un link a un sito web contenente informazioni trapelate o rubate potrebbe essere equiparato al traffico di merce rubata. Criminalizzare il lavoro degli esperti di sicurezza indipendenti danneggerebbe tutti noi e non avrebbe conseguenze gravi per i criminali spinti dal profitto o dall'ideologia.

Responsabilità individuale

I prossimi anni potrebbero essere difficili. Assisteremo ad altre violazioni di dati, e con ogni probabilità anche a un acceso dibattito sulla misura del controllo sul mondo digitale che dovremmo concedere ai governi in cambio della sicurezza. In realtà la protezione del cyberspazio richiederà soluzioni sotto vari aspetti: tecnico, legale, economico e politico. E dipende anche da noi, le persone comuni. Da consumatori, dovremmo esigere dalle aziende una maggiore sicurezza dei loro prodotti. Da cittadini, dovremmo ritenere responsabili i governi quando riducono la sicurezza deliberatamente. E da singoli potenziali punti di debolezza, abbiamo la responsabilità di rendere sicure le nostre cose.

Difenderci implica misure semplici come aggiornare i programmi, usare browser web sicuri e permettere un'autenticazione doppia per i nostri account di e-mail e *social media*. Ma coinvolge anche la consapevolezza che ognuno dei nostri apparecchi è un nodo di un sistema molto più grande, e che le nostre piccole scelte possono avere effetti di ampia portata. Di nuovo, la cybersicurezza è proprio come la salute pubblica: lavatevi le mani e fatevi vaccinare per non diffondere le malattie. ■

PER APPROFONDIRE

La guerra disarmata. Toffler A. e H., Sperling & Kupfer, Milano, 1994.

A Fierce Domain: Conflict in Cyberspace, 1986 to 2012. Healey J. (a cura di), Cyber Conflict Studies Association, Arlington, 2013.

Countdown to Zero Day: Stuxnet and the Launch of the World's First Digital Weapon. Zetter K., Crown, New York, 2014.

Conferenze TED sugli hacker: **www.ted.com/playlists/10/who_are_the_hackers.**

Migliorare la sicurezza informatica. Diffie W., Lipner S. e altri, in «Le Scienze» n. 483, novembre 2008.

Illustrazione di Justin Renteria

SVILUPPO SOSTENIBILE

Come un piccolo gruppo di innovatori sta cercando di nutrire la Cina – e salvare gli oceani del pianeta

di Eric Vance

Fotografie di Dominic Bracco II

Più pesce per tutti

Un sistema di reti divide il Lago Liangzi in zone coltivate da due aziende. Per alleggerire lo sfruttamento delle risorse marine è indispensabile aumentare la produttività degli allevamenti d'acqua dolce.

Eric Vance è divulgatore scientifico, lavora a Città del Messico e si occupa in particolare di oceanografia e neuroscienze.

Nel gennaio 2007 Nguyen Phù preparò la sua barca per quella che avrebbe dovuto essere una normale giornata di pesca al largo della costa vietnamita. Poco dopo aver preso il largo, diverse imbarcazioni cinesi apparvero all'orizzonte. Phù pensò di darsi alla fuga, ma sapeva di non poter andare lontano. Quando le scialuppe militari affiancarono la sua barca, lui e il suo equipaggio non opposero resistenza. «Noi non ci sporchiamo con i cinesi», dice. «Ci mettiamo in questa posizione – si accovaccia con le mani sulla testa – e preghiamo Dio di riuscire a sopportare». Phù racconta che i soldati li condussero in una prigione su un'isola vicina e gli confiscarono la barca.

Il pescatore trascorse oltre un mese in una cella angusta, subendo pestaggi quotidiani. Poi fu lasciato andare: nessun processo, nessuna sentenza, nessuna spiegazione. I militari lo avevano catturato e liberato proprio come un pesce.

La storia di Phu, narratami attraverso un interprete nell'agosto 2014, corrisponde a una modalità ben documentata adottata negli ultimi anni dalla Cina per far sentire la propria presenza nelle acque del Pacifico vicine all'Asia. I pescatori di tonno delle Figi affermano che gli ufficiali cinesi rifiutano di riconoscere i limiti di cattura intorno alle loro isole. La pesca di frodo nei parchi marini giapponesi ha irrigidito le relazioni già tese fra i due paesi. Le Filippine stanno intensificando la presenza militare presso alcuni banchi di pesce, che i pescherecci cinesi ora pattugliano al largo delle loro coste. Secondo la Cina, il Mar Cinese Meridionale fa parte del territorio nazionale da secoli.

La Cina è affamata di pesce. Con il miglioramento della qualità della vita nel paese la richiesta è aumentata vertiginosamente. I cittadini cinesi consumano il 50 per cento pro capite più degli statunitensi – una cifra che, moltiplicata per 1,4 miliardi di persone, significa un consumo di pesce dieci volte superiore a tutte le altre nazioni messe insieme – e la domanda continua ad aumentare. La Cina è anche il più grande produttore mondiale di pesce. Secondo la FAO nel 2012 ha prodotto 57 milioni di tonnellate fra pescato e pesce d'allevamento: un terzo del totale mondiale.

La sua sbalorditiva domanda di pesce ha catapultato la Cina davanti a paesi come il Giappone e gli Stati Uniti tra le nazioni principalmente responsabili dello svuotamento delle riserve ittiche mondiali. Al momento 700.000 pescherecci cinesi pattugliano le acque del globo terrestre, trascinando enormi gabbie lungo il fondo oceanico e trainando reti grandi come campi da calcio. Il risultato è che gli animali usati in molti piatti popolari – cetrioli di mare, squali, abalone – sono in costante diminuzione ovunque nel mondo.

Finora il governo cinese è stato riluttante a riconoscere il problema, pur avendo bandito la zuppa di pinne di pescecane nei ricevimenti ufficiali in seguito ai diffusi appelli dell'opinione pubblica. Ma alcuni lungimiranti scienziati e uomini d'affari cinesi sono preoccupati, come i colleghi occidentali, del pericolo che i moderni metodi di pesca possano esaurire gli oceani prima che questi siano in grado di ripopolarsi. Stanno quindi cercando di invertire la tendenza reinventando l'acquacoltura cinese, passando dalle migliaia di piccoli allevamenti d'acqua dolce - basati ancora su metodi antichi - a imponenti industrie ittiche oceaniche.

L'obiettivo è trasformare le vecchie operazioni dispendiose e inquinanti in una forma di produzione ittica ecosostenibile esclusivamente cinese, aiutando al tempo stesso grandi e piccoli allevatori a prosperare. I promotori di questa iniziativa sperano di potersi appellare al desiderio dei cinesi di consumare pesce sano e pulito, presentando la loro acquacoltura come una moderna alternativa alle pratiche convenzionali. Se i ricercatori e gli

IN BREVE

La Cina produce un terzo del prodotto ittico mondiale, e ne consuma più dei dieci successivi paesi produttori messi insieme. Dalla sua capacità di reinventare gli allevamenti di pesce per ridurre la pesca dipende la salvezza dell'industria ittica del pianeta.

Un gruppo di ricercatori e uomini d'affari sta riprogettando le operazioni di acquacoltura per far sì che specie differenti riciclino gli scarti le une delle altre rendendo gli allevamenti meno inquinanti e più ecosostenibili.

Lo stesso stanno cercando di fare con le migliaia di grandi e piccoli allevamenti ittici d'acqua dolce, che forniscono il 70 per cento del pesce a livello nazionale.

Ora i prodotti ittici allevati in questo modo sono costosi; i prezzi dovranno ridursi prima che i consumatori cinesi acquistino i prodotti in massa.

L'allevamento di Zhangzidao si affida alle correnti oceaniche per spostare le sostanze nutritive tra le diverse specie. Gli allevatori selezionano le giovani capesante prima di metterle in mare (*sotto*), si immergono (*a sinistra*) per controllare la crescita dei cetrioli di mare (*in alto a sinistra*) e preparano grandi blocchi fatti di conchiglie riciclate (*sopra*) per orientare le correnti.

uomini d'affari più importanti riusciranno a trovare modi ecosostenibili per soddisfare la domanda dei piatti favoriti della tradizione, come la carpa, potranno salvare dal collasso l'industria ittica mondiale.

Gestire l'oceano come una fattoria

Le acque che circondano l'isola di Zhangzi sono fredde. Situata accanto alla Corea, dall'altra parte dell'Oceano Pacifico rispetto a San Francisco, quest'area ha un'acqua gelida che si dice produca il miglior pesce del mondo. La particolare caletta in cui sto per entrare è famosa per il suo abalone, che fu scelto nel 1972 per il banchetto organizzato in onore della storica visita del Presidente Nixon che aprì le relazioni commerciali con la Cina.

Oggi però fa caldo, e la muta che abbiamo addosso si rivela soffocante nei minuti che precedono l'istante in cui le mie due guide, il fotografo e io ci buttiamo in acqua come tanti sacchi di patate di neoprene. I miei compagni sono pescatori del Zhangzidao Group, che un tempo era una tradizionale azienda ittica e oggi sta sperimentando una nuova idea. Sono gentili, ma anche un po' sospettosi, visto che siamo i primi giornalisti stranieri a visitare il posto.

Mentre scendiamo nell'acqua scura ammiriamo un comune ecosistema costiero: erbe, alghe e ampie distese sabbiose. Ma vedo subito che il fondale è cosparso di cetrioli di mare, molluschi bivalvi e ricci di mare: non, come ci si aspetterebbe, nascosti dentro nicchie e fessure ma liberi all'aperto. Come bambini a caccia di uova pasquali, i pescatori cominciano a fare man bassa degli organismi marini.

Questo allevamento ittico – se così lo si può chiamare – usa un nuovo approccio che riproduce su vasta scala i sistemi naturali. Dietro di noi, sull'intera superficie di questa cala e di tutte le altre, si allungano file infinite di capesante neonate in gabbia, gettate in acqua fino a quando saranno abbastanza grandi abbastanza da essere raccolte. A parte queste, non compaiono altre gabbie o recinti. Né vengono usati fertilizzanti, mangimi artificiali o antibiotici. Usiamo un modello chiamato IMTA - spiega Liang Jun, il coordinatore scientifico della società - in cui gli escrementi di una specie diventano cibo per le altre».

L'acquacoltura multitrofica integrata (IMTA, *Integrated multitrophic aquaculture*), è un concetto ampio, comparso sotto diverse forme in paesi come il Canada, la Scozia, gli Stati Uniti e la Norvegia. L'idea di fondo è che più specie possono riciclare gli escrementi (o «nutrienti») l'una dell'altra riducendo l'inquinamento delle acque. In genere il metodo assume la forma di più serie di gabbie adiacenti, dove gli occupanti di ognuna forniscono i nutrienti a quelli di un'altra. Il progetto IMTA più noto è quello della baia canadese di Fundy, che usa gabbie allineate per passare, lungo la corrente, i nutrienti dai salmoni ai bivalvi e alle alghe commestibili.

A Zhangzidao, invece, l'approccio è completamente diverso. Zhangzi e varie altre isole svolgono la funzione delle gabbie. La squadra di Jun ha studiato attentamente il movimento dei nu-

Piscicoltori sul Lago Luhu nutrono i pesci mandarino che vengono coltivati localmente dopo avere rinunciato alle carpe, che inquinavano le acque.

trienti lungo le rive, costruendo talvolta barriere artificiali per deviare le correnti che li spostano. Le parti dell'isola ricche di nutrienti vengono disseminate di giovani capesante allevate per crescere qui, e i loro predatori attentamente rimossi.

Le acque si arricchiscono in modo naturale di poche specie selezionate. L'azienda controlla alcuni marcatori chiave come la temperatura, ma gli animali vengono per lo più lasciati a se stessi fino alla raccolta. Non c'è l'involontaria e antieconomica rimozione di specie indesiderate come nella pesca libera, e l'inquinamento viene ridotto. L'azienda ricicla le conchiglie in blocchi di cemento da usare per le future barriere.

In Occidente alcuni sostengono che quella di Zhangzidao non è una vera acquacoltura multitrofica integrata. A distinguere i progetti IMTA è la loro dimensione. «Lì, quando decidono di realizzare l'acquacoltura in una baia, lo fanno massicciamente, come sarebbe impossibile in Occidente», sostiene il biologo Thierry Chopin dell'Università di New Brunswick, impegnato nel progetto della Baia di Fundy. «È qualcosa di completamente diverso».

L'operazione della Baia di Fundy copre alcuni ettari e include nove zattere galleggianti su cui si coltivano i mitili usati per filtrare le emissioni. La coltivazione oceanica dell'isola di Zhangzai, invece, è grande quattro volte Chicago. La Baia di Fundy produce circa 200 tonnellate di alghe commestibili ogni anno, e 300-400 tonnellate di mitili. Le isole attorno a Zhangzai producono 60.000 tonnellate di alghe commestibili, principalmente come prodotto collaterale venduto in loco. Il vero guadagno proviene dalle 200 tonnellate di ricci di mare, dalle 700 tonnellate di lumache, dalle 2000 tonnellate di abalone e da qualcosa come 50.000 tonnellate di capesante raccolte ogni anno. L'operazione è così produttiva che Zhangzidao ha recentemente organizzato un'attività di pesca turistica per liberarsi dei numerosi pesci che circolano nelle calette nutrendosi degli invertebrati in fase di sviluppo.

Secondo Jun questo tipo di acquacoltura può funzionare solo su vastissima scala. «Per avere un ritorno economico occorre un sistema di almeno 100 chilometri quadrati, circa le dimensioni di una piccola città. E per sostenere un allevamento del genere occorre conoscere a fondo le dinamiche dell'oceano». Ruota lo schermo del computer per mostrare una mappa dettagliata delle isole, dove si vedono i luoghi di più alta concentrazione dei nutrienti e, quindi, di massimo rendimento. I fattori più importanti sono legati per lo più alle correnti oceaniche, che Jun può modulare gettando in mare blocchi di cemento grandi come frigoriferi, che fanno da barriere coralline artificiali. Finora ha inabissato 20.000 blocchi.

I critici sostengono che Zhangzidao non è un vero esempio di IMTA perché non alleva pesci pinnati, i cui escrementi, in teoria, nutrirebbero gli invertebrati. Preferiscono usare un termine meno tecnico, come «ranch oceanico». Zhangzidao è impressionante per le dimensioni e l'efficienza, ma non è certo perfetta. Secondo un portavoce, oltre metà della fattoria è troppo profonda per la raccolta a mano, e i pescatori usano quindi ancora le reti a strascico: reti pesanti, larghe 5 metri, che vengono trainate lungo il fondo oceanico danneggiandolo. E i prodotti che escono da Zhangzidao sono molto cari. I cetrioli di mare – piccoli e bitorzoluti parenti delle stelle marine – costano in Cina fino a 250 dollari al pezzo. Come negli Stati Uniti e in Europa, anche in Cina i frutti di mare ecosostenibili sembrano destinati soprattutto ai ricchi.

Stare dietro al consumatore

Le dimensioni senza precedenti del progetto suggeriscono tuttavia una soluzione possibile per l'altissima domanda cinese di prodotti ittici. Il segreto è far sì che la produzione ecosostenibile di pesce sia alla portata di consumatori di qualsiasi fascia di reddito. «Commerciare prodotti ecosostenibili è una grossa sfida per la Cina, almeno in questo momento», ammette Yuming Feng, presidente di Zhangzidao. «I consumatori avranno l'ultima parola, e aggiunge la loro domanda sarà: "A me che ne viene?"».

Per ora i consumatori cinesi non appaiono molto attenti all'ambiente, né particolarmente desiderosi di spendere di più per aiutare a preservarlo. Hanno una preoccupazione più grande. «In Cina, governo e consumatori cercano soprattutto prodotti affidabili, badano alla sicurezza dei cibi», commenta An Yan, del Comitato per la conservazione marina attivo nell'Asia del Pacifico.

I timori per la salute legati all'avvelenamento da piombo e al latte alla melammina hanno messo in allarme i consumatori cinesi sulla provenienza di ciò che mangiano. Ma Yan sostiene che i cambiamenti nei sistemi di produzione finalizzati a migliorare la sicurezza del cibo aprono a una generale salvaguardia. All'inizio della sperimentazione Zhangzidao esportava le capesante soprattutto negli Stati Uniti, in Australia e in Europa, vendendole a consumatori ecoconsapevoli. Oggi tutti i suoi prodotti ittici restano in Cina, commercializzati come puliti e sani anziché *eco-friendly*.

Sembra una promozione vincente, a giudicare dall'attività del mercato nella vicina Danian, dove il desiderio del prodotto è evidente. Cammino lungo file di cetrioli di mare, granchi, capesante e lumache, assalito da richiami in cinese. Vongole fresche mi schizzano d'acqua i pantaloni. Donne anziane raccolgono gambe-

LA CLASSIFICA

La pescheria più grande

La Cina è di gran lunga il più importante fornitore mondiale di pesce, crostacei e molluschi, ovvero di «prodotti ittici» provenienti da oceani, laghi e fiumi. Nel 2012 (secondo i dati più recenti) la Cina ha prodotto il 17,7 per cento dei prodotti ittici selvatici (*colonna a sinistra*), quasi tre volte la seconda nazione produttrice, l'Indonesia.
Dato ancora più impressionate, la Cina ha prodotto il 61,7 per cento del pesce da allevamenti di acqua dolce e salata (*colonna di destra*). Se l'industria della pesca in acque libere, in via di estinzione, vuole sopravvivere, il mondo - Cina in testa - dovrà allevare più pesce.

Produzione ittica, marina e di acqua dolce (2012)

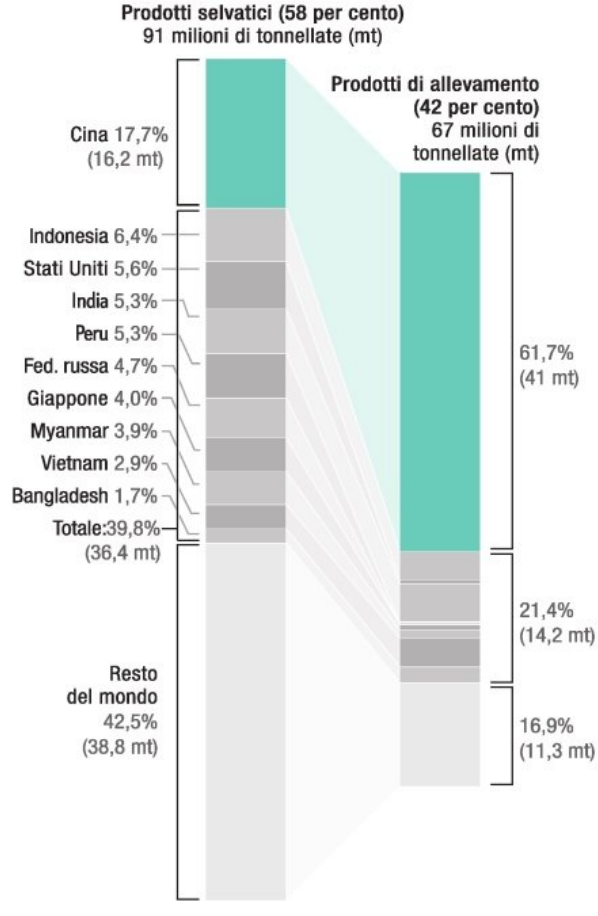


Grafico: Tiffany Farrant-Gonzalez; fonte: *FAO Yearbook: Fishery and Aquaculture Statistics*, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014

ri con palette per la spazzatura, sotto sgargianti striscioni multicolori che raffigurano pesci sorridenti da cartone animato.

Nel mercato del pesce quasi ogni banco spaccia i propri prodotti come provenienti da Zhangzi, il che è improbabile considerato che Zhangzidao vende soprattutto ai grandi rivenditori e ai ristoranti di alto livello, ma dimostra quanto il marchio sia ambito. «Hanno barriere coralline artificiali, molto salutari per i pesci», spiega Meng Ni Ou Yang, proprietario di un banco che commercializza prodotti «dell'isola» facendoli pagare il 20 per cento in più. Un altro venditore dice semplicemente che «lì l'acqua è più pulita».

Nessuno dei pescivendoli si mostra preoccupato per l'ambiente, e tutti dicono che la salvaguardia della natura non è così importante per i loro clienti. Eppure anche altre regioni stanno sperimentando l'IMTA. Lungo le coste vicino a Dalian e più a sud, nella baia di Sanggou, si aprono distese sterminate di coltivazioni di alghe basate per lo più su questa tecnica, sebbene con varietà di forme di vita decisamente inferiori. Per soddisfare le imponenti richieste di una Cina affamata, gli acquacoltori oceanici dovranno espandere questi modelli in misura decisamente superiore.

Laghi e stagni più puliti

Le centinaia di migliaia di pescherecci presenti in Cina possono dominare il mercato globale, ma i prodotti ittici nel loro complesso non bastano a soddisfare la domanda interna del paese. Oltre il 70 per cento del pesce consumato a livello nazionale proviene da laghi e fiumi. I recenti scandali relativi all'inquinamento delle acque dolci hanno tuttavia suscitato un certo allarme. Di conseguenza, per tenere a freno l'impatto della Cina sul mare sarà anzitutto necessario restituire fiducia negli allevamenti d'acqua dolce. Ed è ciò che sta cercando di fare una rete di ricercatori disseminati nelle aree più importanti per la piscicoltura.

L'importanza dell'acquacoltura intorno al fiume Yangtze è evidente appena si sbarca a Wuhan, a 500 chilometri da Shanghai. Si trova al centro della più ampia regione di allevamento ittico nel paese che vanta i più ampi allevamenti ittici del mondo. «Guarda a sinistra», suggerisce Shouqi Xie, un ricercatore dell'Accademia delle scienze cinese, mentre fiancheggiamo distese di stagni che sembrano non finire mai. «Ecco perché chiamiamo la provincia di Hubei la terra dei mille laghi».

Circa 18.400 chilometri quadrati di territorio cinese – una superficie equivalente più o meno al New Jersey – sono stagni per pesci. Anche se è difficile immaginarlo, gli esperti cinesi dicono che un quinto delle proteine animali del mondo proviene dai pesci d'acqua dolce, metà dei quali arrivano da qui, dal cuore della Cina lungo lo Yangtze.

Ultimamente, però, le notizie sul crescente inquinamento idrico e sul cibo contaminato hanno minato la fiducia dei consumatori nei prodotti lacustri tradizionali, come le carpe e i pesci gatto. «Tutto questo è assurdo», si lamenta Xie. «Noi monitoriamo la vita dei pesci dall'inizio alla fine. Con il pesce selvatico, invece, nessuno segue dove vanno gli animali o in quali inquinanti si imbattono».

Tuttavia i tradizionali allevamenti d'acqua dolce non sono propriamente ecosostenibili. L'acquacoltura cinese risale a Fan Li, filosofo e tattico del V secolo a.C., consigliere del potente re Goujian di Yue. Dopo una carriera militare di successo, Fan Li si ritirò nella città lacustre di Wuxi, dove scrisse il primo manuale di acquacoltura del mondo. Il libretto, lungo appena 400 caratteri, include dettagli come il numero di carpe con cui iniziare, la stagione migliore per l'allevamento e la raccomandazione di includere le tartarughe per tenere alla larga il «dragone delle inondazioni».

Le pratiche antiche hanno funzionato per migliaia di anni, con piccoli stagni operanti accanto a fattorie terrestri che mantenevano acque pulite e pesce sano. Negli anni ottanta, però, l'industria si è indirizzata verso ampi stagni industriali. Questo cambiamento, insieme all'enorme crescita di altre industrie, ha causato un pesante inquinamento. Nel 2007 la situazione è culminata in una disastrosa crescita di alghe a Tai Hu (Hu significa «lago»), la leggendaria dimora di Fan Li. «Poiché quasi tutta l'acqua del ru-

binetto a Wuxi proviene da Tai Hu, i cittadini non potevano bere dai rubinetti. L'acqua scendeva nera», racconta Xie. «Se facevi una doccia con quell'acqua, era davvero puzzolente».

La marea nera del 2007 è stata un campanello d'allarme per la Cina. La gente non poteva più fidarsi dell'acqua che beveva o del pesce che mangiava. E sebbene la crescita di alghe non sia stata causata principalmente dagli allevamenti ittici, l'avvenimento ha indotto gli acquacoltori cinesi a focalizzarsi sull'alta produttività che preserva l'ambiente. Persone come Xie lavorano per mantenere l'acqua pulita incrementando al contempo la produzione.

Un equilibrio da mantenere

Gli ecosistemi d'acqua dolce sono costantemente impegnati a mantenere un delicato equilibrio fra troppe e troppo poche sostanze nutritive. Nei Grandi Laghi, per esempio, alcune specie invasive esauriscono i nutrienti lasciando l'acqua pulita e ricca di ossigeno, ma morta. Lo Yangtze, invece, ha troppe sostanze nutritive, come azoto e fosforo, ma troppo poco ossigeno: il risultato è un'acqua fangosa e verdastra abitata dalle uniche creature che possono crescere in un ambiente acquatico povero di ossigeno: le alghe.

Per secoli in molti allevamenti di pesce le sostanze nutritive hanno mantenuto un equilibrio naturale. Negli ultimi anni l'allineamento si è spostato. Il problema deriva in parte dall'inquinamento, ma la causa è anche la stessa acquacoltura. In Cina è molto diffusa la carpa, un pesce che cresce rapidamente e si nutre di tutto, dalle alghe alle acque di scolo. Le carpe espellono escrementi ricchi di azoto che sedimentano sul fondale. Questa sostanza nutritiva, assieme ai mangimi per pesci, nutre le alghe, che quindi trattengono la luce dalle piante in grado di produrre ossigeno. Il ciclo continua finché quasi nulla può vivere eccetto le carpe e le alghe. In un decennio di rapido sviluppo, le alghe di un lago della provincia di Hubei sono aumentate almeno di 20 volte, dimezzando la visibilità delle acque.

Le riforme devono avvantaggiare sia l'ambiente sia gli allevatori e gli scienziati devono lavorare insieme alla gente del posto

Rifletto su queste cose mentre salgo su un piccolo motoscafo sulla riva del Liangzi. Sul lago incombe un silenzio sinistro, e non riesco a capire se la cappa sopra di noi siano nuvole basse o smog. L'acqua è verdastra e perfettamente ferma, come una gigantesca minestra di piselli.

Dieci anni fa decine di gabbie piene di carpe sono state impilate lungo le rive del lago, e i loro escrementi sembrano avere ucciso qualunque altra forma di vita acquatica. L'amministrazione locale ha chiesto aiuto all'Università di Wuhan per riorganizzare gli allevamenti nel lago, il secondo per dimensioni nella provincia. Jiashou Liu, il collega di Xie presso l'Accademia delle scienze cinese, si è reso conto che la concentrazione di escrementi stava alimentando la proliferazione delle alghe.

Oggi le gabbie non esistono più. I piscicoltori gestiscono l'intero lago come una sorta di gabbia, lasciando che sia la natura a guidare i pesci. Anche le carpe sono quasi tutte sparite. Allevatori e ricercatori si concentrano sui pesci che valgono di più, come i granchi e il pesce mandarino, che inquinano meno ma fanno anche diminuire il numero di pesci nel lago. E lungo la riva hanno aggiunto piante che riportano ossigeno nell'acqua. Una volta all'anno gli allevatori radunano i pesci in un angolo del lago e li raccolgono tutti insieme. Come a Dalian, non c'è bisogno di fertilizzanti o mangimi costosi, che accrescono le sostanze nutritive. E con più spazio dove nuotare i pesci contraggono meno malattie. Sorprendentemente, il volume minore non si ripercuote sul risultato finale. «Il profitto è più alto rispetto a quello che si otterrebbe dagli stagni», afferma Fu Jun Deng, dirigente di una delle due aziende che gestiscono il lago. «È un lavoro piuttosto semplice. Tutto quello che facciamo è pattugliare il lago per assicurarci che nessuno rubi il pesce».

Meno pesci, tuttavia, non soddisferanno la domanda in crescita. E il lago non è pulitissimo; appare torbido, ancora affollato di alghe. La qualità dell'acqua però è migliorata. C'è più ossigeno, l'azoto è diminuito, le rive sono fitte di piante acquatiche e la visibilità sta lentamente aumentando.

Altri grandi laghi naturali della regione vengono riabilitati con progetti simili, ancora sovrastati però dalle migliaia di piccoli stagni disseminati nella campagna circostante. Sono questi stagni a conduzione familiare a nutrire realmente la nazione, producendo una gran quantità di cibo per ettaro. Mantenere l'acqua pulita e i pesci in salute in attività così piccole è una sfida. Oltre a seguire i grandi progetti, quindi, gli scienziati stanno ideando metodi a bassa tecnologia per allevare un prodotto più sano ed ecosostenibile.

Per purificare l'acqua Congxin Xie, professore alla Facoltà di agraria della Huazhong University of Science & Technology, ha condotto alcuni esperimenti con le isole galleggianti. Mi accompagna di mattina presto a uno stagno di controllo vicino alla cittadina di Gong'an. Sulla superficie dell'acqua galleggia una mezza dozzina di strutture di plastica bianca che traboccano di *Ipomoea aquatica* («spinaci d'acqua»). Sembra di vedere gigantesche fioriere galleggianti. Xie ha studiato per anni le interazioni delle piante acquatiche con l'ambiente, e alla fine si è concentrato su questa specie perché cresce in fretta e crea ampi reticolati di radici utilizzando notevoli quantità di sostanze nutritive. Xie dice che, nei tre mesi passati, qualche fioriera è stata sufficiente ad abbassare di un terzo il livello di ammoniaca nell'acqua. (Troppa ammoniaca uccide i pesci).

«La qualità dell'acqua è migliorata. Appare più limpida», dice Yung Chang Hu, uno dei piscicoltori che gestiscono gli stagni. «Non ci sono più i pesci morti dell'anno scorso». Con una barca di legno il figlio di Chang ci conduce alle gabbie, e Xie strappa qualche manciata di spinaci d'acqua. Le strutture di plastica, lunghe circa come due o tre vasche da bagno, non sono ancorate al fondo ma fluttuano di qua e di là. La costruzione di una gabbia costa circa 150 dollari, che possono essere ripagati in un anno dalla vendita degli spinaci come prodotto biologico. In un ristorante delle vicinanze il cuoco cucina al vapore le foglie di spinaci, ottenendo una specie di condimento salato che, aggiungendovi qualche noce, serve come contorno per vari tipi di pesce d'acqua dolce.

Il segreto è la mescolanza dei prodotti, dice Xie. Le riforme devono avvantagiare sia l'ambiente sia gli allevatori, e gli scienziati devono lavorare a stretto contatto con la gente del posto. Le «scatole per spinaci» hanno soddisfatto entrambi i criteri, e i piscicoltori locali annunciano di voler coprire con queste almeno il 5 per cento degli stagni.

Flora e fauna acquatiche sono diventate il perno degli sforzi cinesi per ripulire le acque nazionali. Dopo l'esplosione delle alghe a Wuxi, nel 2007, i ricercatori hanno intensificato gli sforzi per includere le paludi nelle attività di piscicoltura. L'Accademia delle scienze cinese ha cominciato a finanziare vari progetti riguardanti lo Yangtze usando lumache d'acqua dolce, fiori di loto e deci-

Marito e moglie fertilizzano uno stagno nei pressi di Wuhan. I ricercatori stanno cercando di aiutare migliaia di famiglie a gestire i loro stagni in modo più ecosostenibile, passaggio indispensabile per soddisfare la sempre crescente domanda di pesce in Cina.

ne di altre piante e animali in grado di combattere l'inquinamento delle acque.

Ge Hu, per esempio, un lago poco più a nord di Tai Hu, non ospita più le gabbie. Ora è ricoperto da 2,6 chilometri quadrati di giacinti d'acqua, coltivati per combattere l'inquinamento. Lì nei pressi, l'impianto di acquacoltura Wu Jing – un fiorente complesso di stagni industriali – ha dedicato il 30 per cento dei propri stagni a un'analoga forma di filtraggio delle paludi.

Un'altra serie di stagni collegati al Lago Luhu, a Wuhan, un tempo allevava nelle sue cooperative carpe altamente inquinanti. Con 12.000 chilogrammi di pescato annuo, gli allevatori avrebbero potuto ricavare migliaia di dollari per ettaro, se tutto avesse funzionato a dovere. Ma di rado le cose si svolgevano correttamente. A quella densità, malattie e inquinamento dilagavano. Nel 2008, con l'aiuto dell'Accademia delle scienze cinese, l'allevamento aggiunse le paludi all'area di deflusso connessa alla sezione principale del lago. Nel frattempo gli allevatori passarono dall'allevamento delle carpe, strettamente stipate, al pesce mandarino, che è dieci volte meno concentrato, più ecocompatibile e più redditizio.

«È un esperimento nuovo ogni anno. Introdurremo prima cinquanta o cento esemplari di una specie [di pesci d'acqua dolce] e poi cento di un'altra specie», spiega Hui Shang Xia, piscicoltore cinquantenne che lavora qui da decenni. «Non ho mai perso denaro in uno stagno, ma a volte guadagno meno».

Altre soluzioni richiedono aggiustamenti più creativi. Alcuni scienziati dell'Istituto di ricerca sui macchinari e strumenti dell'Accademia delle scienze cinese per l'industria ittica di Shanghai, per esempio, hanno messo a punto una macchina che risolve un problema comune agli stagni più piccoli. La questione è la scarsa fotosintesi nelle piante che potrebbero filtrare le sostanze nutritive. Quando il Sole splende, una carenza di fosforo nell'acqua limita la fotosintesi, ma ciononostante esiste abbondante fosforo nei fondali, dice Hao Xu, direttore dell'Istituto, indicando dall'altra parte un vasto complesso di stagni sperimentali color verde pisello. I tecnici dell'istituto hanno messo a punto un macchinario alimentato da pannelli solari che rimescola il fango lungo il fondale dello stagno. Allo scintillare del Sole l'apparecchiatura aumenta il fosforo disponibile per le piante. Quando le nuvole coprono il Sole, la macchina si ferma.

Il bisogno di riuscire

La recente esplosione di ricchezza ha alimentato in Cina un desiderio di proteine animali che non ha precedenti nella storia mondiale. Gli sforzi per tutelare l'ambiente devono essere ugualmente importanti per le acque dolci e salate. L'Accademia delle scienze cinese sta lavorando su circa 30.000 ettari di stagni lungo il bacino dello Yangtze.

Zhangzidao è il più grande impianto per la piscicoltura di questo tipo al mondo e, insieme alla vicina coltivazione di alghe commestibili, sovrasta ogni altro progetto IMTA del pianeta.

Il lavoro trae molte idee dagli Stati Uniti e dall'Europa, ma sarebbe sciocco aspettarsi che l'acquacoltura si presenti qui nello stesso modo dei suoi equivalenti occidentali. Negli Stati Uniti e in Europa si consumano soprattutto pesci d'acqua fredda, come la trota e il salmone, che richiedono acque molto ossigenate. In Cina si preferiscono la carpa e il pesce gatto, che vivono in acque povere di ossigeno.

Anche il punto di vista cinese riguardo alla salute dell'ecosistema è molto diverso. «Ciò che per noi è un lago inquinato, nel modo di pensare cinese è considerato un modo efficiente di produrre cibo», spiega Trond Storebakken, esperto di industria ittica all'Università norvegese di scienze naturali, nei pressi di Oslo. «Ma un lago molto inquinato è un disastro. La capacità di mantenere un buon equilibrio è l'aspetto più impressionante».

Storrebakken ha intrattenuto molti scambi con l'Accademia cinese di scienze per l'industria ittica. Viaggiando per il paese è rimasto colpito dalla capacità degli scienziati di riprodurre senza sosta i sistemi naturali, facendo uso del ruolo dei predatori, degli erbivori e dei filtratori tutti insieme.

È fiducioso nel fatto che la Cina, dopo avere sviluppato e modellato per migliaia di anni il proprio rapporto con i prodotti ittici, apra ora un altro capitolo. «È qualcosa di completamente diverso da ciò che facciamo noi in Occidente», afferma. «Loro controllano queste sfide. Non alla perfezione, è chiaro, ma molto meglio che in qualunque altro luogo». ■

Questo reportage e la relativa documentazione fotografica sono stati sostenuti da una donazione del Mongabay Special Reporting Initiatives program (mongabay.org).

PER APPROFONDIRE

Sustainable Seafood and Integrated Fish Farming in China. World Wide Fund for Nature International. Video on line: **www.youtube.comwatch?v=18xyR8KWrgE#t=220**.

Rich Countries Pay Zombie Fishing Boats $5 Billion a Year to Plunder the Seas. Guilford G., in «Quartz». Pubblicato on line il 25 giugno, 2014. **http://qz.com/225432/rich-countries-pay-zombie-fishing-boats-5-billion-a-year-to-plunder-the-seas.**

Freshwater Aquaculture in PR China: Trends and Prospects. Wang Q., e altri, in «Reviews in Aquaculture». Pubblicato on line il 24 ottobre 2014.

Rivoluzione blu. Simpson S., in «Le Scienze», n. 512, aprile 2011.

10000x SE 8.3 2 µm 30.0 kV 1.0

lescienze.it

PER CHI AMA LA SCIENZA, SARÀ LA PIÙ GRANDE SCOPERTA.

Y&R

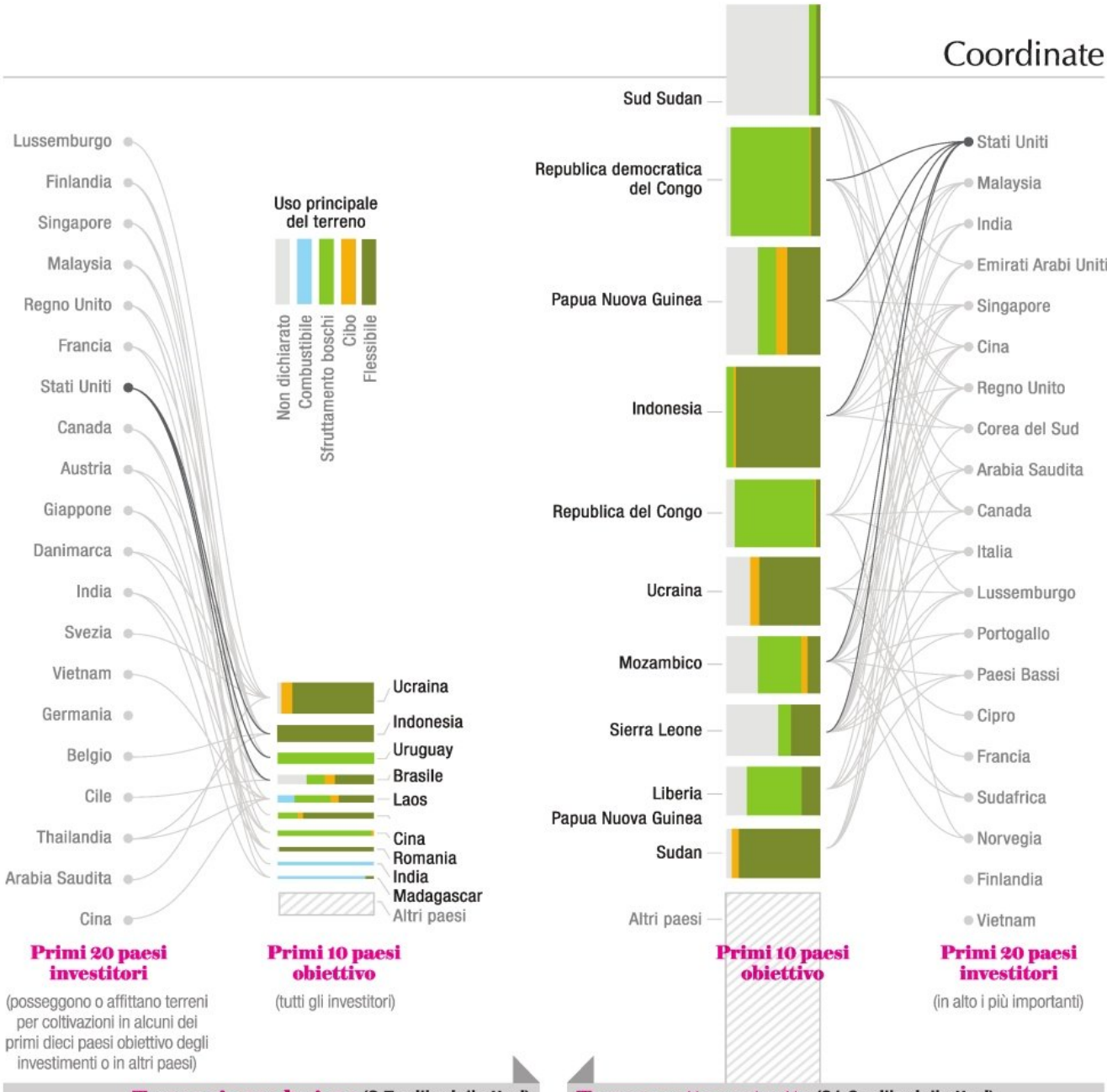
LESCIENZE.IT IL SITO TUTTO NUOVO CHE OFFRE UN QUADRO AMPIO, AGGIORNATO E APPROFONDITO SUL MONDO SCIENTIFICO.

L'edizione italiana di "Scientific American" è online con un nuovo sito, arricchito da un notiziario scientifico, dalle pubblicazioni dei ricercatori italiani nel mondo e da una grafica chiara e accattivante. Un punto di riferimento prezioso, per essere sempre aggiornati su tutte le ultime scoperte e ricerche. In più, per chi si abbona alla rivista cartacea, il vantaggio esclusivo di poter consultare senza limiti l'intero archivio di articoli della rivista, dal 1968 ad oggi. Con Le Scienze, nasce un sito tutto da scoprire.

ABBONATI A "LE SCIENZE" E AVRAI ACCESSO A TUTTO L'ARCHIVIO ONLINE.

www.lescienze.it

Le Scienze



Questa è la mia terra

Per soddisfare la domanda di cibo, combustibile e legno, alcuni paesi acquisiscono terreni oltre confine

La terra fertile sta scarseggiando ovunque nel mondo, specialmente quella per colture alimentari, foraggio, biocombustibili, legname e fibre vegetali come il cotone. Per produrre questi beni, nazioni ricche come gli Stati Uniti e piccole nazioni con poco spazio stanno comprando o affittando in altri paesi estese superfici di terreno adatte per l'agricoltura. I prodotti sono poi rispediti a casa o venduti localmente, in alcuni casi tagliando fuori agricoltori, proprietari terrieri e affari locali. Nei 15 anni passati, secondo il Land Matrix Global Observatory, aziende e gruppi pubblici dei paesi investitori hanno acquisito 31,8 milioni di ettari, un'area grande quasi quanto la Germania. Le coltivazioni riguardano solo 2,7 milioni di questi ettari. In definitiva, sembra in atto un esteso trasferimento di possedimenti agricoli dal sud al nord del mondo.

Mark Fischetti

Stati Uniti, Malaysia e India stanno acquistando o affittando le aree più estese di terreno (*classifica all'estrema destra*). Paesi con *governance* debole, come Sud Sudan e Papua Nuova Guinea, spesso sono i principali obiettivi (*colonna a destra*), secondo Kimberly Nicholas ed Emma Li Johansson, entrambe dell'Università di Lund, in Svezia, che hanno analizzato i dati.

I dati mostrati coprono il terreno acquisito dal 2000 al 2014. Non includono accordi che coinvolgono più di due paesi, che potrebbero non distinguere la quota di ciascun paese; questi accordi aumentano il totale del terreno sotto contratto a 51,1 milioni di ettari.

Fonte: Land Matrix Global Observatory; dati del 4 febbraio 2015, www.landmatrix.org; Emma Li Johansson, Università di Lund (*dati aggiuntivi ed elaborazione*)

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Un caso di probabilità casuale

«Non ce la farai mai.» Una frase così comporta lanci di guanti di sfida e conseguenti duelli all'arma bianca: viene però tollerata quando il novero dei presenti si limita a due umani maschi, una gatta femmina e una congrua quantità di birre. Se a questo si aggiunge l'ambientazione assai diversa dall'alba brumosa dietro il Convento delle Carmelitane Scalze (visto che è un pomeriggio afoso in cucina con frigorifero aperto) e il non trascurabile dettaglio che gli umani in questione sono Piotr e Rudy, e la gatta è Gaetanagnesi, tutta la tensione della disfida si squaglia più in fretta d'un fiocco di neve nei paraggi di una supernova.

Ciò non di meno, la pipa più celebre della matematica ricreativa non demorde: «Ricapitolo i termini: tu, Piotr Rezierovic Silverbrahms, sostieni che il disgusto verso la teoria delle probabilità della dottoressa Alice Riddle è tale da rendere impossibile pronunciare le parola "casuale" in sua presenza senza che la suddetta dottoressa vada su tutte le furie e passi a violente vie di fatto. Giusto?»

«Giusto – conferma Doc mentre apre un'altra lattina – ma non tirare a fregare: hai detto "casuale", e non "causale", eh? Non giochiamo con le parole o errori di stampa: con la parola "causale" Treccia ci va a nozze.»

«Per chi mi ha preso, per l'Azzeccagarbugli di manzoniana memoria? Nessun trucco meschino del genere. Ebbene, allora io, Rudy D'Alembert, mi impegno a pronunciare alla di lei presenza la terribile parola, e scommetto di sopravvivere indenne. Anzi, pronuncerò pure la parola "probabilità", e la farò pronunciare perfino a lei.»

«No, con te non scommetto. E poi sono parole colloquiali, possono spuntare in un discorso anche senza tirare in ballo la teoria delle probabilità, non ci sto. Ma se ce la farai ti renderò merito preparandoti un caffè. Che cosa hai in mente?»

«Mah, in parte quanto hai intuito: Alice tollera il termine "casuale" quando si riferisce a una disposizione poco ordinata, e sempre che non sia preceduto dalla parola "variabile". L'altra parolaccia, invece, posso solo sperare di fargliela pronunciare per negazione. È uno sporco trucco, lo so, ma se la posta in palio è così alta...»

«Andata. E adess...»

«...adesso mettete a posto la spesa, o altrimenti digiunate per il resto della settimana! – l'ingresso della dottoressa Riddle è accompagnato dal frusciare dei sacchetti della spesa scaricati sul tavolo – e forse digiunerete lo stesso, visto che la spesa l'ho dovuta fare io anche se questa settimana il turno del supermercato non spettava a me!»

La sola faccia sorridente è quella della micia, che salta a coda ritta verso Alice con un rombante miscuglio di fusa di saluto. Le due maschie facce umane mostrano solo la fretta del tentativo di mettere sommariamente in ordine la cucina, per poi aprirsi in un corale: «Ciao Treccia! Eccoci, eccoci; mettiamo tutto a posto noi, certo!».

L'operazione non è velocissima, ma infine tutto il contenuto dei sacchetti finisce nei meandri del frigorifero, giusto in tempo per accogliere Alice che ricompare in cucina dopo essersi cambiata d'abito.

«Avete appena finito, eh? Io e la gatta ci mettiamo la metà del tempo, e troviamo addirittura il modo per curarci le unghie, nel frattempo.»

«È colpa di Rudy! – frigna Doc – restava per minuti davanti al frigo, e poi spostava tutto quello che avevo già riposto io!»

«Non "spostavo", ridisponevo: e lo facevo secondo la logica richiesta dalle leggi dell'uomo e della natura.»

«Fammi capire: dobbiamo preoccuparci dell'effetto del gradiente gravitazionale sulla curvatura del cotechino?»

«No, più semplicemente, l'incauto Doc disponeva tutto "faccia in alto"...»

Illustrazione di Stefano Fabbri

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di luglio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Un solitario inventato da Rudy sembra coinvolgere la teoria più odiata da Alice. Ma Piotr non è d'accordo...

IL PROBLEMA DI MAGGIO

Il mese scorso si parlava di frisbee e di birre: il primo quesito sui lanci del frisbee concerneva il limite superiore teorico pari a $n(n - 1)$. Si chiedeva una strategia generale e la verifica che il limite superiore fosse anche il massimo possibile. Di fatto è così, e si può vedere per induzione: partendo da $n = 2$ si verifica che con $n - 1$ giocatori il numero di tiri possibili è $(n - 1)(n - 2)$; all'arrivo del nuovo giocatore n, i preesistenti $n - 1$ giocatori ripeteranno gli stessi passaggi di prima salvo che, alla loro prima ricezione del frisbee, lo passano al nuovo giocatore che lo restituisce al mittente. Il metodo, che è generale, genera $(n - 1)(n - 2) + 2(n - 1) = n(n - 1)$, ovvero il massimo, nonché limite teorico, dei lanci.

Nel secondo quesito, il ragionamento che consente a Rudy di individuare il colore delle sue birre si basa (come sempre in questi casi) sul presupposto che tutti i contendenti siano logici perfetti. Senza entrare nel dettaglio completo del ragionamento necessario, basti notare che si tratta di una reiterazione del «modulo logico» che funziona, per eliminazione, più o meno così: «Supponiamo che io (Rudy) abbia due birre scure: Alice allora al suo secondo turno avrebbe capito, vedendo le mie birre, che se anche lei avesse avuto due birre scure, Piotr avrebbe dedotto di averne due chiare: ma visto che non lo ha fatto, io non ho due birre scure...». Opportunamente reiterato per le possibili ipotesi iniziali, questo conduce Rudy a dedurre di avere una chiara e una scura, pur non sapendo con esattezza il colore delle birre dei suoi due compagni.

«Incauto lo dici a tua sorella. Come vuoi disporla, la roba? Nella sola maniera decente per riconoscerla, guardando attraverso il *cellophane* o leggendo l'etichetta, no?»

«Vedi che sei incauto? La maggior parte degli involucri recano la data di scadenza al di sotto, e questa è l'informazione più importante. Ma siccome tu sei poco fantasioso (nonché incauto), oltre alle mie ho dovuto anche risistemare le tue vettovaglie.»

«Guarda che roba, che disastro... – geme Alice – questo frigorifero è un campo di battaglia, roba piazzata in maniera del tutto casuale! GC, perché non provi a capire quale sia, su sette miliardi di esseri umani, la probabilità di trovarne un altro dalla mente contorta come la tua?»

«Diamine, speravo di vincere, ma qui stravinco addirittura...»

«Cosa blateri?»

«Niente, una cosuccia tra me e Doc. Comunque, tutto questo mettere e rovesciare cose mi ha fatto pensare a qualcosa di simile: ho qui il mio sacchetto di monete da un cent...»

«So già la risposta, ma lo chiedo lo stesso: quante sono?»

«Oh, le solite n. Adesso le estraggo e le dispongo in cerchio. Ovviamente le facce che mostrano sono a caso, alcune C, alcune N.»

«C e T, vorrai dire – ringhia Alice – da che mondo e mondo, si parla di testa o croce, T e C in tutti i problemi che si rispettino. E siccome hai detto "a caso", sto cominciando a irritarmi.»

«Ho detto e ribadisco C e N, perché gli euro hanno una faccia nazionale e una faccia comune, o se preferisci continentale. Ecco, per cominciare, scegli proprio una C, rimuovila e rovescia le due monete contigue, sempre che esistano. Se ne manca una, giri solo quella che c'è, se non ce ne sono affatto non giri niente. E vai avanti così, fin quando è possibile.»

«Bello, come no. L'ideale per le serate uggiose. Ma lo scopo di tutto questo, scusa?»

«Ovviamente, si tratta di un gioco da fare da soli, e proprio come nel "solitario" classico (quello che gli ignavi si ostinano a chiamare "dama cinese"), si vince solo se si riescono a togliere tutte le monete. Chiaro adesso?»

Alice sbuffa come una pentola a pressione dalla valvola difettosa: «Il meccanismo sì, ma...»

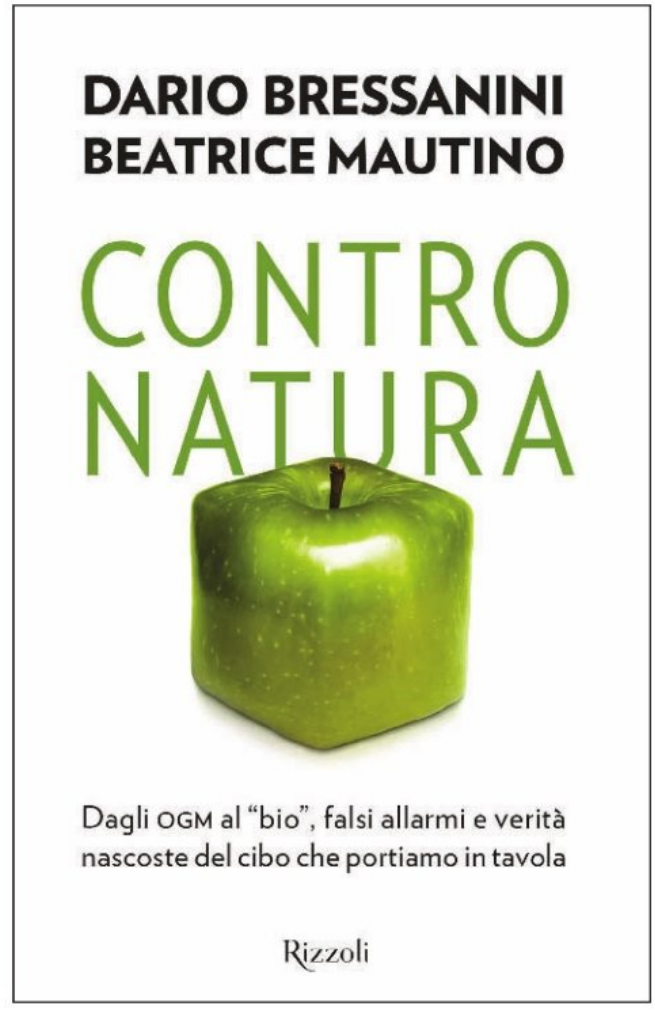
E qui Rudy sogghigna: «Ma certo, Treccia, è ovvio... non voglio mica che passi le serate così, a rovesciar monete. Quello che voglio è che tu mi dica, con una rapida occhiata e con solo le capacità computazionali di un batrace o di Doc, se riuscirai a finire il gioco o no.»

«Ma vista la disposizione tutt'altro che preordinata, è evidente che qui ci voglia quella schifezza di teoria di cui non voglio neppure nominare il nome, e...»

«L'hai già detta, tanto, la parolaccia, Alice... – sospira Piotr – quindi non infuriarti. Mentre vado in cucina a preparare il caffè, rilassati e prova a risolvere il quesito: il maledetto GC in un colpo solo ha vinto una scommessa con me, fatto nominare la probabilità e il caso a te, e il tutto per mezzo di un problema in cui le variabili casuali e la teoria delle probabilità non servono a niente. Per punizione, la probabilità che io gli avveleni il caffè sarà molto diversa da zero.»

Perché il cibo OGM non è il male

Contro natura
di Dario Bressanini e Beatrice Mautino
Rizzoli, Milano, 2015, pp. 306 (euro 17,50)



Inquietanti come la mostruosa creatura nella quale il dottor Frankenstein aveva infuso la vita animando frammenti di cadavere con scariche elettriche (l'autrice del romanzo, Mary Shelley, si era ispirata agli studi di Galvani): questa è l'idea che molti hanno degli organismi geneticamente modificati, gli OGM. Schierarsi a favore delle biotecnologie alimentari equivale a una specie di suicidio per chi aspira al favore del pubblico. E naturalmente, potendolo evitare, nessuna azienda alimentare sarebbe così avventata da inserire in bella vista sui propri prodotti l'etichetta «con ingredienti geneticamente modificati», evocando nel consumatore immagini poco rassicuranti.

Che il problema di fondo riguardi la comunicazione lo hanno ben compreso gli autori di questo libro, che si sono posti l'obiettivo di mostrare al lettore come il nostro giudizio sul miglioramento genetico dei cibi possa ribaltarsi se si guardano le cose da un altro punto di vista. È quello che Dario Bressanini, docente universitario ed esperto di scienza dell'alimentazione, e Beatrice Mautino, biotecnologa e comunicatrice della scienza, hanno messo in evidenza anche con la mostra *Food, la scienza dai semi al piatto*, che si può visitare fino al 28 giugno al Museo di storia naturale di Milano. Qui, per esempio, si traccia la storia di quello che è considerato uno dei prodotti di punta della tradizione culinaria italiana, il riso Carnaroli, che in realtà si scopre non più vecchio degli anni quaranta e frutto della ricerca scientifica, guardata con diffidenza dai cultori del «buono, pulito e giusto». Storia che viene ripresa anche in questo libro, mettendone in luce retroscena insospettabili che dimostrano una volta per tutte come sia lo *storytelling* a determinare il giudizio. È questa la *magna culpa* delle aziende produttrici di OGM, che non hanno pensato al modo di raccontarsi al consumatore finale, focalizzandosi solo sugli agricoltori.

Una lezione che gli autori hanno applicato nella scelta dello stile narrativo, che è uno dei punti di forza del libro. Non si tratta di un saggio in senso stretto, perché i dati tecnici sono calati in un racconto avvincente come un reportage di viaggio. Il modello dichiarato è la prosa incalzante del giornalista e saggista statunitense Michael Pollan «che ha l'invidiabile capacità di unire dati, informazioni e testimonianze per costruire storie che mentre le leggi ti senti lì con lui in mezzo a un campo di patate dell'Idaho». Se l'obiettivo era questo, si può ritenere pienamente raggiunto, perché, nel dipanarsi del racconto, al lettore sembrerà di sentire davvero il profumo sprigionato dalla lenta cottura del riso Venere o di passare in rassegna, a bordo di una jeep, la selva di erbacce che spuntano da una delle poche risaie davvero biologiche.

La narrazione immersiva presenta anche il vantaggio di non calare le verità dall'alto e di lasciare che sia il lettore a scoprirle, alla fine di un percorso del quale si sente parte integrante. Un modo accattivante ed efficace per sollecitare riflessioni importanti. Tra queste il paradosso dell'OGM, che è tale solo quando la legge lo dice, escludendo, per esempio, tutte le varianti ottenute per mutagenesi. Di qui la proposta di un'etichettatura obbligatoria davvero trasparente, che sveli l'ipocrisia di un paese che si proclama OGM-*free*, ma lo è, di fatto, solo a parole.

Il ribaltamento di prospettiva vale anche in senso positivo: e qui si inserisce la storia di un OGM che dovrebbe figurare tra le eccellenze del *made in Italy* e, invece, complice una legislazione scientificamente illogica, è rimasto confinato nei laboratori. Si tratta della mela resistente alla ticchiolatura, varietà sviluppata a Bologna da Silviero Sansavini, un OGM che sfida tutti i luoghi comuni, perché non è il prodotto di una multinazionale, bensì di un centro di ricerca pubblico, perché non lucra sui brevetti di geni e, soprattutto, perché permette di tutelare l'ambiente e il consumatore evitando i trattamenti anticrittogamici permessi anche dall'agricoltura biologica. Si tratta di un risultato straordinario, frutto della ricerca biotecnologica nazionale, bloccata da una normativa miope e scientificamente infondata. Una sfida a cui l'Italia ha scelto di rinunciare e che altre nazioni stanno, invece, raccogliendo, imponendoci una riflessione che non si può più rimandare.

Anna Rita Longo

Da non credere alle proprie orecchie

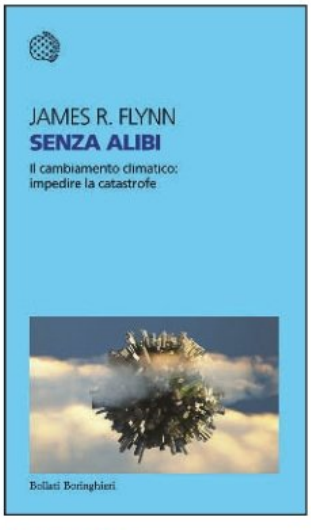
Pianeta acustico
di Trevor Cox
Dedalo Edizioni, Bari, 2015,
pp. 320 (euro 17,00)

Si parte da una fogna di Londra, non il posto che ci immagineremmo come punto di partenza per la scoperta delle meraviglie acustiche del mondo. Eppure, sotto a uno di quei tombini di ghisa, in un corridoio ricoperto di liquami e avvolto di miasmi pungenti, Trevor Cox ha una vera e propria epifania acustica: mentre si accorge che le sue parole sono riflesse dalle pareti in modo unico, roteandogli intorno «come un motociclista che si esibisce sul Muro della Morte. Tutti i miei organi di senso erano sopraffatti dal ribrezzo, tranne le orecchie, intente ad assaporare un meraviglioso gioiello acustico». Le fogne di Londra sono solo uno dei luoghi che Cox, docente di ingegneria acustica all'Università di Salford, ha visitato negli ultimi 25 anni per studiare le caratteristiche acustiche più straordinarie che natura e uomo hanno generato.

Il punto di partenza è l'ecologia acustica teorizzata, disciplina che ha rivolto la propria attenzione all'immagine acustica degli ambienti, un approccio che, secondo Cox, dovrebbe essere più considerato in una società che ha grande attenzione per gli aspetti visivi, ma ne presta poca a quelli acustici. Per questo Cox raccoglie registrazioni di suoni e rumori in un sito web, sonicwonders.org, nel tentativo di preservare una sorta di «biodiversità acustica». Ma il libro è soprattutto una continua scoperta dei fenomeni acustici che Cox ha studiato nella sua carriera. Si comincia con il riverbero delle chiese gotiche e si arriva al caratteristico rintocco del Big Ben di Londra, passando, tra l'altro, per le dune «cantanti» del deserto, la comunicazione ultrasonica dei pipistrelli e i luoghi più silenziosi del pianeta. Sempre con le orecchie ben tese.

Marco Boscolo

Come allontanarsi dal baratro del riscaldamento globale



Senza alibi
di James Flynn
Bollati Boringhieri, Torino, 2015,
pp. 176 (euro 15,00)

Senza alibi e con un'urgenza comune: evitare il punto di non ritorno di un pianeta sempre più caldo e su cui la perdita del controllo degli equilibri ambientali sarà presto irreversibile. Quella del cambiamento climatico è un'urgenza che dovrebbe portare il dibattito su temi concreti, al di là delle divisioni ideologiche. Ed è con un certo ottimismo che James Flynn, filosofo e psicologo neozelandese, indica la strada da seguire: «D'altra parte nell'Ottocento il consenso internazionale sull'immoralità della schiavitù rese quella pratica indifendibile», perciò è più che ragionevole pensare che anche stavolta l'umanità riuscirà a trovare un accordo. Non stupisce, pensando che si tratta del Flynn che ha scoperto il cosiddetto effetto Flynn, secondo cui il quoziente intellettivo medio dell'umanità sta inesorabilmente aumentando.

Nel *pamphlet* appena uscito per i tipi di Bollati Boringhieri e scritto per «il bisogno di assumermi una responsabilità personale», Flynn suggerisce intanto di lasciar perdere la politica, che per ragioni di opportunismo non riuscirà mai ad affrontare la questione. E di chiedere alle Nazioni Unite di incentivare le economiche navi per la nebulizzazione di acqua di mare in atmosfera: la schiuma salata, spiega, proteggerà gli oceani dalla radiazione solare e sarà una buona misura aspettando energie davvero pulite, attese per il 2065 – 2100. Nel frattempo dovremmo comunque contenere le emissioni inquinanti e le loro conseguenze, stabilizzando la popolazione mondiale a dieci miliardi di persone. Insomma, conclude Flynn sottolineando il rischio di contraddire la propria fama per l'impegno contro la crescita a tutti i costi, si tratta di puntare sul progresso, anche scientifico. Perciò avanti, ma con giudizio.

Silvia Bencivelli

Tony Reed/Spalsh News/Corbis

A Carlo Rovelli il premio Galileo 2015

L'edizione di quest'anno del Premio Galileo per la divulgazione scientifica è andata a Carlo Rovelli, ordinario di fisica teorica all'Università di Aix-Marseille, dove dirige il gruppo di ricerca in gravità quantistica. Rovelli è stato premiato per il suo libro *La realtà non è come ci appare*, pubblicato per i tipi di Raffaello Cortina nel 2014. A decretare il successo del libro di Rovelli è stata una giuria popolare formata da studenti di 110 scuole superiori di secondo grado, rappresentati-

ve di altrettante province italiane, che ha votato tra una cinquina di titoli composta anche da: Marco Massa e Romano Camassi con *I Terremoti. Quando la terra trema*, Il Mulino (2013); Roberto Defez con *Il caso OGM. Il dibattito sugli organismi geneticamente modificati*, Carocci- Città della Scienza (2014); Claudio Bartocci con *Dimostrare l'impossibile*, Raffaello Cortina (2014); Vincenzo Schettino con *Scienza e Arte*, Firenze University Press (2014).

I cinque titoli finalisti avevano superato una prima fase di selezione, curata da una giuria scientifica presieduta quest'anno da Vittorino Andreoli, psichiatra e scrittore, già direttore del Dipartimento di psichiatria di Verona-Soave e membro della New York Academy. (*cb*)

La scienza in trincea
di Angelo Guerraggio
Raffaello Cortina, Milano, 2015, pp. 230 (euro 19,00)

Gli scienziati italiani e il dilemma della Grande Guerra

In occasione del centenario della prima guerra mondiale, il matematico Angelo Guerraggio racconta le scelte, tra neutralismo e interventismo, degli scienziati italiani all'epoca di quella che venne chiamata la «Grande Guerra» e riflette sul ruolo della scienza nei conflitti. La scienza può essere uno strumento per vincere le guerre ma è anche uno strumento per costruire la pace, «per fare guerra alla guerra». Per definizione, infatti, non è né buona né cattiva: «Va governata». E proprio cent'anni fa, secondo l'autore, è maturata la consapevolezza che «al tavolo delle decisioni strategiche devono sedere pure gli scienziati, che non intendono delegarne le applicazioni a militari e politici».

Le applicazioni militari dei risultati scientifici ci sono sempre state, tanto che Guerraggio inizia il suo racconto dal re sumero Shulgi, che intorno al 2075 a.C., per rendere più efficiente l'organizzazione dell'esercito, introdusse le prime forme di logistica e di calcolo aritmetico necessario per la sua gestione. Ma cent'anni fa le guerre sono diventate più tecnologiche e da allora si vincono anche e soprattutto con le armi della scienza. E anche se il binomio «scienza e guerra» ai più richiama alla mente l'immagine dei fisici impegnati nella costruzione della bomba atomica nella seconda guerra mondiale, per Guerraggio è fuori di dubbio che in questo gioco delle parti la prima guerra mondiale rappresenti un punto di svolta: l'avvio di più stretti rapporti tra mondo scientifico e militare che hanno portato poi al progetto Manhattan, alle bombe intelligenti e ai droni. Non solo perché ha visto la sperimentazione e l'uso delle armi chimiche nei campi di battaglia, il battesimo militare per aerei e dirigibili, l'invenzione del sonar, ma anche perché in quell'occasione le scelte dei singoli scienziati, guerrafondai o pacifisti, sono diventate un elemento della fabbrica del consenso e sono state usate come megafono autorevole delle diverse posizioni in campo. Per esempio il matematico Vito Volterra si schiera subito a favore dell'intervento italiano e, nella convinzione che sia una guerra giusta, si arruola volontario. Il dissenso è invece chiaro e netto da parte del matematico Tullio Levi-Civita: convinto che «non è la guerra la via attraverso la quale si risolvono i problemi, bensì la solidarietà tra i popoli, proprio come avviene nel campo della ricerca, dove il progresso è assicurato dalla collaborazione tra diversi studiosi». I casi più noti di pacifismo in campo scientifico, racconta però Guerraggio, vengono dal Regno Unito: uno per tutti, il logico e filosofo della matematica Bertrand Russell il cui impegno s'intreccia con quello di Albert Einstein, vera icona della scienza «pacifica» del secolo scorso.

Simona Regina

Il fantasma dell'universo Che cos'è il neutrino
di Lucia Votano
Carocci, Roma, 2015, pp. 168 (euro 13,00)

Caccia ai neutrini, un'avventura scientifica e intellettuale

Laboratori sotterranei, nel profondo delle miniere o delle montagne, esperimenti in Antartide, nella Pampa argentina, o poggiati su un fondo marino. La caccia al neutrino è un'impresa molto più avventurosa di quanto un profano potrebbe pensare. Ma l'avventura principale è intellettuale e culturale, descritta nel dettaglio e con un lessico quasi sempre accessibile ai più nel libro di Lucia Votano, fisico e già direttore dei Laboratori nazionali del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare.

Il secolo scorso, spiega Votano, è stato il secolo d'oro della fisica. La nostra conoscenza della natura ha fatto passi da gigante: abbiamo costruito teorie ed enormi esperimenti, e soprattutto abbiamo costruito un'unica descrizione della materia, riduzionista e afferrabile con un colpo d'occhio, come sarebbe piaciuta a Democrito 25 secoli fa. È il modello standard delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali, che molto spiega e molto ha potuto permetterci di prevedere, ma di cui molto rimane ancora da capire. Come l'impossibilità di includervi i fenomeni gravitazionali descritti dalla relatività generale, o come il neutrino, appunto. Che è un fantasma, cangiante ed elusivo ai nostri occhi e ai nostri strumenti, ma è anche una delle particelle più numerose di cui sia fatto l'universo ed è capace di mettere in crisi tutto il castello di cui sopra. Ma non è solo nella fisica delle particelle, l'interesse per il neutrino. È anche nella cosmologia e nella storia che può raccontarci sull'origine dell'universo. Perché neutrini sono prodotti dappertutto: ne produce il nostro corpo (e tutta la materia vivente), emergono dal centro della Terra, ci arrivano dall'atmosfera e dal Sole. E, come è stato provato dall'esperimento IceCube, neutrini arrivano qui anche dallo spazio fuori della nostra galassia. Sono come messaggeri che provengono dalle zone più lontane dell'universo, oppure dal cuore della nostra stella, e possono portarci informazioni preziose su quello che avviene laggiù, come possono spingere una nuova ricerca in scienze della Terra. Ma potranno anche avere implicazioni concrete nel controllo del nucleare civile e nucleare.

Per questo gli scienziati hanno costruito numerosi laboratori sotterranei ed esperimenti nei posti più complicati del pianeta. È ricerca di base, spiega con efficacia Votano: non chiedeteci a che cosa serva di concreto, perché è solo da qui che possiamo permettere all'umanità di fare nuovi passi avanti. In senso tecnologico ma soprattutto culturale.

Silvia Bencivelli

Per il cielo, e non solo

Una mostra presso l'INAF-Osservatorio astronomico di Roma racconta gli strumenti del passato usati per studi di astronomia e cartografia

Se oggi ogni *smartphone* che teniamo in tasca può avvalersi del Global Positioning System, o GPS, non lo dobbiamo solo alle aziende tecnologiche che li hanno messi sul mercato, ma a una vasta schiera di scienziati. Prima che i satelliti che permettono al nostro telefono di sapere dove ci troviamo sulla Terra andassero in orbita, per secoli sono stati gli astronomi a occuparsi di come determinare con precisione la posizione di un punto sulla superficie del nostro pianeta.

Questa funzione di «GPS *ante litteram*» svolta dagli astronomi è parte dell'attività di astrometria, o astronomia di posizione, che per secoli è stata di cruciale importanza per l'umanità ed è il cuore della mostra di quest'anno organizzata dal Museo astronomico e dall'Osservatorio di Roma. Attraverso la valorizzazione delle collezioni di strumenti storici e cimeli, curata da Francesco Poppi, la mostra ripercorre la storia di questa attività scientifica con un particolare occhio per gli aspetti legati all'osservatorio romano.

In questo senso, infatti, un ruolo importante lo ha ricoperto Angelo Secchi, direttore alla metà dell'Ottocento dell'Osservatorio del Collegio Romano (uno dei due osservatori della capitale che si sono poi fusi nell'attuale struttura). In quel periodo, come raccontato dalla mostra, Secchi eseguì due calcoli importanti. Il primo, su incarico di Pio IX, fu la misura della base geodetica della via Appia allo scopo di raccordare le reti di triangolazione dello Stato Pontificio. L'altro fu la determinazione del meridiano zero italiano, quello che passa per Monte Mario, e che per decenni è stato il punto di riferimento per la cartografia del nostro paese.

Queste attività di Secchi erano tipiche dell'astronomo dell'epoca, perché fino a quando la tecnologia più moderna non ha fornito sostegni più pratici, erano di fondamentale importanza per misurare lo scorrere preciso del tempo, determinato dal moto apparente del Sole in cielo, e le posizioni geografiche, grazie ai cataloghi celesti che indicano dove si trovano di giorno in giorno gli astri sulla volta celeste.

Per fare tutto questo, l'uomo ha inventato e costruito strumenti allo scopo: astrolabi, cerchi moltiplicatori, teodoliti, sestanti. Tra tutti gli esemplari in mostra, forse ancor più affascinanti sono le carte celesti e terrestri che racchiudono le conoscenze e le hanno trasmesse di generazione in generazione.

Marco Boscolo

Prima del GPS. Sopra, ottante, astrolabio e globo terrestre; accanto un cerchio ripetitore. Sono alcuni degli strumenti esposti alla mostra curata dal Museo astronomico e copernicano presso l'INAF-Osservatorio astronomico di Roma.

Cortesia INAF-Osservatorio astronomico di Roma (*tutte le foto e le illustrazioni, 3*)

Dove & quando:

Astronomi: GPS del passato!
Storie di viaggi e di scoperte
Fino al 14 giugno
Museo astronomico
e copernicano dell'INAF-
Osservatorio astronomico
di Roma
Via Frascati 33, Monte Porzio
Catone (Roma)
www.oa-roma.inaf.it/diva

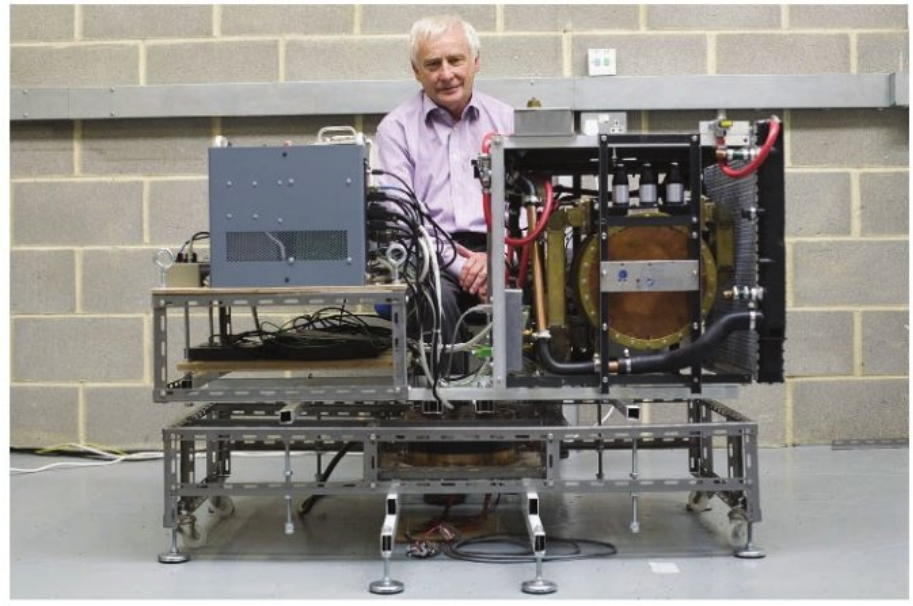
di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

EmDrive, il motore magico

Ascesa e caduta dell'invenzione che risolveva i problemi della propulsione spaziale

Circa un anno fa un gruppo di ricercatori ha annunciato di aver collaudato con successo un propulsore spaziale che fa a meno del propellente: un'affermazione che susciterebbe sberleffi automatici se non fosse che i ricercatori in questione appartengono al laboratorio Eagleworks della NASA e lavorano presso il Johnson Space Center a Houston. Non si tratta, insomma, dell'ennesimo gruppo d'inventori della domenica o di ciarlatani pronti a vendere macchinari miracolosi e poi scappare con i finanziamenti degli investitori creduloni.

Il propulsore si chiama EmDrive ed è stato inventato alcuni anni fa dall'ingegnere britannico Roger Shawyer, secondo il quale è possibile produrre una piccola spinta propulsiva facendo rimbalzare microonde all'interno di una cavità metallica di opportuna forma troncoconica. La sperimentazione condotta presso la NASA sembrava avvalorare questa tesi, promettendo scenari rivoluzionari: un veicolo dotato di EmDrive sarebbe libero dal fardello di dover portare con sé il propellente, come avviene invece con i razzi spaziali attuali, che sono in sostanza immensi serbatoi volanti. Anche una spinta lievissima, se applicata continuamente, alla fine produrrebbe velocità che permetterebbero per esempio di raggiungere la Luna in quattro ore invece di tre giorni e Marte in due mesi anziché otto.



Ingegnere della spinta. Roger Shawyer con il suo motore che produrrebbe una spinta propulsiva grazie alle microonde, ma di cui però non c'è ancora nessuna validazione scientifica.

Come per ogni annuncio di tecnologie rivoluzionarie, anche per EmDrive non sono mancate le critiche: la presunta spinta è al limite della sensibilità degli strumenti usati per rilevarla ed è stata osservata paradossalmente anche nell'esemplare di controllo del motore, che non doveva produrla, e questo è un classico sintomo di una sperimentazione impostata erroneamente. Inoltre i test iniziali erano stati condotti in aria invece che nel vuoto, per cui la spinta rilevata poteva essere semplicemente un flusso d'aria prodotto dal riscaldamento dell'apparato in funzione. C'è poi il problema non banale che il presunto principio di funzionamento di EmDrive viola la legge di conservazione della quantità di moto: uno dei capisaldi della fisica, che non si può abbandonare o riscrivere con leggerezza.

Ma di recente gli stessi ricercatori della NASA hanno ripetuto nel vuoto gli esperimenti con EmDrive e hanno ottenuto lo stesso una spinta, stroncando una delle obiezioni principali dei critici, che di fronte alla serietà dell'ente spaziale statunitense e ai risultati sperimentali conseguiti sembravano sempre più oppositori che cocciutamente non vogliono accettare la nuova scoperta. O almeno così è parso fino a quando l'ostinazione dei critici ha fatto emergere che il risultato sensazionale del funzionamento nel vuoto non è documentato in un articolo scientifico convalidato da terzi, ma è solo un annuncio fatto in un forum su Internet da un membro di Eagleworks, e ha messo a nudo il fatto che non c'è nessuna pubblicazione scientifica rigorosa sull'EmDrive.

Non solo: il laboratorio Eagleworks opera con un budget di 50.000 dollari all'anno, largamente insufficiente per qualunque ricerca di qualità in campi sofisticati come questo. EmDrive è insomma un esperimento amatoriale, condotto nel tempo libero da dipendenti NASA senza però l'avallo sostanziale dell'ente spaziale e privo di conferme da parte di altri esperti.

Anche se i fatti fanno purtroppo sfumare per ora le speranze di viaggi spaziali facili e veloci, la vicenda di EmDrive è una salutare dimostrazione del modo in cui procede la ricerca scientifica seria: non scarta neanche le ipotesi più strane, ma le critica senza pietà e senza fare sconti neppure agli enti di ricerca più prestigiosi, pretendendo sempre verifiche impeccabili e rifuggendo dai sensazionalismi.

Andrew Buurman/eyevine/Contrasto

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie, OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello.*

Molecole mangiaproteine

Esperimenti da fare in casa mostrano come funzionano gli enzimi proteolitici

Avete mai letto attentamente l'etichetta della confezione dei fogli di gelatina, la cosiddetta «colla di pesce»? Si usano per preparare alcuni dessert, come la panna cotta o gli aspic dolci o, semplicemente, gelatine di frutta. Tuttavia non è possibile preparare gelatine con alcuni tipi di frutta fresca. La gelatina è costituita da una proteina, il collagene, che una volta sciolta a caldo e lasciata raffreddare può formare un reticolo tridimensionale che intrappola l'acqua, donando a un liquido acquoso una consistenza semisolida. Alcuni frutti – come ananas, kiwi e papaya – contengono enzimi (chiamati enzimi proteolitici o proteasi) che agiscono rompendo i filamenti di gelatina in tanti frammenti, non più in grado di creare una struttura tridimensionale stabile.

Un semplice esperimento da fare in casa mostra le proprietà di questi enzimi. Usate i fogli di gelatina, secondo le istruzioni della confezione, per gelificare un bicchiere d'acqua. Potete usare un bicchiere di plastica per facilitare l'uscita della gelatina una volta solidificata. Ponete la gelatina a temperatura ambiente su un piatto e depositateci sopra una fetta di kiwi fresco appena tagliato. L'enzima proteolitico del kiwi, l'actinidina, a contatto con la gelatina, comincerà lentamente a distruggere il reticolo tridimensionale del collagene. Nel giro di mezza giornata, vedrete la gelatina dissolversi in una pozza d'acqua sotto i vostri occhi. Per questo motivo se volete preparare una gelatina a partire da ananas o kiwi freschi dovete prima disattivare quegli enzimi, per esempio scaldando il succo che si desidera gelificare. L'enzima portato a temperature superiori a 80 °C viene denaturato, perde le sue proprietà e si può quindi procedere alla gelificazione.

Il collagene è la proteina che tiene insieme, avvolgendole, anche le fibre muscolari. Gli enzimi proteolitici possono avere un effetto drammatico su un pezzo di carne, come possiamo osservare con un altro esperimento. Questa volta prendiamo una fetta di ananas fresco, non in lattina, i cui enzimi proteolitici hanno una azione più forte di quelli del kiwi. Riducete la fetta in poltiglia con un frullatore e spargetela su una bistecca, ovviamente cruda, adagiata su un piatto. L'enzima dell'ananas, la bromelina, agisce più velocemente se portato a 40 °C quindi vi consiglio di intiepidire il forno e lasciarvi dentro a riposare la bistecca con l'ananas per qualche ora. Alla fine dell'esperimento potrete constatare come la carne si sfaldi anche toccandola, letteralmente, con un grissino, poiché il collagene che avvolgeva le fibre come una guaina è stato degradato del tutto dagli enzimi.

Molti altri vegetali contengono enzimi proteolitici. Il più potente, sfruttato anche dal punto di vista commerciale, per ora è stato trovato nella papaya. La papaina, questo il nome dell'enzima, agisce a caldo ed è venduto puro in soluzione, pronto per essere iniettato in tranci di carne di animali particolarmente duri, come il toro o il bisonte. Iniettato nelle carni può, se lasciato agire a temperature superiori ai 50 °C, ammorbidire notevolmente un muscolo. Negli ultimi anni sono stati scoperti enzimi proteolitici anche in altri frutti, come i fichi, e in vegetali come gli asparagi. Le loro proprietà non sono ancora note con precisione ma potete cimentarvi in qualche esperimento preparando estratti, facendo attenzione a non distruggere l'enzima portandolo a temperature troppo elevate, da usare per marinare la carne. È interessante notare come molte ricette tradizionali di carne e di pesce dei paesi tropicali usino ananas e papaya come ingredienti, e anche nell'antica Roma i fichi erano spesso usati nei piatti di carne. Forse in modo inconsapevole, ai tropici e nell'antica Roma avevano già scoperto l'effetto degli enzimi proteolitici.

Succhi ammorbidenti. Per rendere più tenera la carne, basta marinarla con succo di ananas o kiwi, e attendere che gli enzimi proteolitici di questi due frutti agiscano sulle fibre muscolari.

TongRo Images/Corbis

La crisi dell'olivo

di Anna Rita Longo e Lisa Signorile

Parassiti e malattie, tra cui l'invasione del batterio *Xylella fastidiosa*, sono stati i fattori determinanti del brusco calo della produzione di olio di oliva avvenuto in Italia nel 2014. Il problema, che colpisce particolarmente perché riguarda una pianta simbolo dell'ambiente mediterraneo, investe equilibri economici e ragioni culturali ed è stato favorito dall'incuria e dalla disinformazione.

Gluoni: la colla che ci tiene insieme

di Rolf Ent, Thomas Ullrich e Raju Venugopalan

I fisici sanno da decenni che le particelle che chiamano gluoni mantengono integri i protoni e i neutroni, e quindi tengono insieme l'universo. Tuttavia, malgrado notevoli progressi nella comprensione del loro funzionamento, alcuni particolari rimangono ancora sorprendentemente misteriosi.

L'ascesa dei tirannosauri

di Stephen Brusatte

Benché *T. rex* sia il più famoso dei dinosauri, finora la scarsità di fossili aveva reso difficile ricostruirne le origini e l'evoluzione. Recenti scoperte sembrano suggerire che il gruppo a cui appartiene abbia radici evolutive profonde e inaspettatamente umili, e che presenti una varietà di forme maggiore del previsto.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 98, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Supervisione editoriale: Daniela Hamaui

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Cinzia Sgheri, Ale Sordi (*grafico*), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Paolo Bardelli (tel. 02 57494338, 335 6454332)
e-mail pbardelli@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - maggio 2015

Copyright © 2015 by Le Scienze S.p.A.

ISSN0036-8083

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore. Si collabora alla rivista solo su invito e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Benedetta Antonielli: *Più pesce per tutti*; Silvia Baldi: *Piccole meraviglie, Farmaci contro il cancro*; Daniele Gewurz: *Anelli di fuoco*; Lorenzo Lilli: *Come sopravvivere alla cyberguerra*; Cristina Serra: *Fasciature intelligenti, Lanciate i nanorobot;* Alfredo Tutino: *Conquista te stesso, conquisterai il mondo, Evoluzione estrema.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

In conformità alle disposizioni contenute nell'articolo 2 comma 2 del «Codice Deontologico relativo al trattamento dei dati personali nell'esercizio dell'attività giornalistica ai sensi dell'Allegato A del Codice in materia di protezione dei dati personali ex d.lgs. 30 giugno 2003 n.196», Le Scienze S.p.A. rende noto che presso la sede di Via Cristoforo Colombo, 90, 00147, Roma esistono banche dati di uso redazionale. Per completezza, si precisa che l'interessato, ai fini dell'esercizio dei diritti riconosciuti dall'articolo 7 e seguenti del d.lgs.196/03 - tra cui, a mero titolo esemplificativo, il diritto di ottenere la conferma dell'esistenza di dati, la indicazione delle modalità di trattamento, la rettifica o l'integrazione dei dati, la cancellazione ed il diritto di opporsi in tutto od in parte al relativo utilizzo - potrà accedere alle suddette banche dati rivolgendosi al Responsabile del trattamento dei dati contenuti nell'archivio sopraindicato presso la Redazione di Le Scienze, Via Cristoforo Colombo, 90, 00147 Roma.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 7827 del 9/2/2015

Max Frigione/ANSA/Corbis (*oliva*); James Gurney (*dinosauri*)

Le Scienze

edizione italiana di Scientific American

SPECIALE ABBONAMENTO

Ogni mese direttamente a casa tua le ultime frontiere della ricerca scientifica e tecnologica.

IN ESCLUSIVA, solo con l'abbonamento, ti assicuri la possibilità di consultare sul **nuovo sito www.lescienze.it** gli oltre **4.200 articoli** pubblicati dal 1968 ad oggi!

E, se vuoi, puoi decidere di **regalare l'abbonamento alle stesse condizioni!**

Fino al 38% di sconto

SCEGLI LA TUA OFFERTA!

DURATA	PREZZO DI COPERTINA	PREZZO PER TE	RISPARMIO
1 ANNO - 12 NUMERI	~~€54,00~~	**€39,00**	€15,00
2 ANNI - 24 NUMERI	~~€108,00~~	**€75,00**	€33,00
3 ANNI - 36 NUMERI	~~€162,00~~	**€99,00**	€63,00

Offerta valida solo per l'Italia

SCEGLI DI ABBONARTI!

È CONVENIENTE
Più aumenta la durata del tuo abbonamento, più aumenta il risparmio!

È COMODO
Riceverai Le Scienze ogni mese a casa tua senza alcun costo aggiuntivo e con il prezzo bloccato!

È FACILE
✓ Collegati al sito www.ilmioabbonamento.it

✓ Chiama il n. 199.78.72.78* **(0864.25.62.66 per chi chiama da telefoni non abilitati o cellulari.)**

***Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa).**

✓ Compila, stacca e spedisci - anche via fax - la cartolina che trovi nella rivista

Allianz

Anche quest'anno Allianz è l'RC Auto numero 1 in Italia.

L'Istituto Tedesco Qualità e Finanza ha riconosciuto ad Allianz
il primato assoluto nell'RC Auto, confermando anche nel 2015
il riconoscimento "Migliore RC Auto Agenzia"
per soddisfazione dei clienti in tutte le categorie.

Scegli il meglio, vieni a trovarci in agenzia o vai su allianz.it

allianz.it

AVVERTENZA: Messaggio pubblicitario con finalità promozionale. Prima della sottoscrizione leggere il fascicolo informativo disponibile in agenzia e su allianz.it